U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ESTUDO LABORATORIAL DO COMPORTAMENTO DE UMA RESTINGA MÓVEL CONFINADA POR CILINDROS DE GEOSSINTÉTICOS

AFONSO ALVES MOREIRA DE VASCONCELOS PORTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes

Doutora Engenheira Luciana Paiva das Neves

JUNHO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família,

The man who fears losing has already lost.
– George R.R. Martin, *A Game of Thrones*

AGRADECIMENTOS

Não quero deixar de agradecer a várias pessoas que contribuiram para o desenvolvimento desta tese.

Aos meus orientadores, Professor Fernando Veloso Gomes e Professora Luciana das Neves, pelo apoio e paciência demonstrados durante a elaboração desta dissertação.

Ao engenheiro Rui China, pelos ensinamentos acerca dos procedimentos laboratoriais.

Ao Dr. Filinto Oliveira, da empresa Geosin, represtante da Tencate em Portugal, pelo interesse demonstrado no projecto e fornecimento de material.

Ao Sr. Luís Pinto que tornou possível a construção e reconstrução do modelo e a feliz realização dos ensaios durante três duras e cansativas semanas em regime de contra-relógio.

Aos meus pais por me terem proporcionado, não só durante a elaboração da dissertação, mas também ao longo de todo o curso, as melhores condições e pelo apoio demonstrado em momentos mais difíceis.

Queria também deixar o meu agradecimento ás entidades, SCOURCOAST e GEOPROTEC.

Por último, aos meus amigos, que sempre demonstraram interesse no meu trabalho, ao mesmo tempo que me incentivaram e me fizeram companhia nas noites de escrita até de madrugada.

RESUMO

A costa oeste portuguesa, sendo muito energética, tem vindo a demonstrar ao longo dos anos evidências de fenómenos de erosão costeira. A região de Ofir (Esposende) é uma das zonas com tendência a degradar-se, tendo sido alvo de várias intervenções nos últimos anos. A restinga existente no local proporciona a defesa da cidade de Ofir da acção do mar, sendo por isso necessário tomar medidas que salvaguardem a sua manutenção. Nesse sentido, foi proposta pelo IHRH uma estrutura de defesa dunar em cilindros geossintéticos. Visto que este material começou a ser utilizado há relativamente pouco tempo, soluções deste tipo despertam o interesse dos engenheiros. Neste trabalho pretende-se um aprofundamento do conhecimento nesta matéria.

Para isso, procedeu-se à modelação física de um troço da restinga. Foram efectuadas três séries de ensaios, em tanque de ondas, todos eles com o mesmo nível de água (+4,0 m ZH) e clima de agitação típico na zona estudada (Hs = 1.5-3.5 m e Tp=8-12 s). Na primeira foi colocado o contorno de cilindros ficando as juntas alinhadas. Na segunda, devido ao fraco desempenho que as juntas apresentaram procurou-se reforçar as juntas Na última série foram executados os ensaios sem qualquer protecção na restinga com o objectivo de aferir a sua utilidade.

Concluiu-se que é inegável a necessidade de intervir na manutenção da restinga ou corre-se o risco da mesma desaparecer e consequentemente da cidade de Esposende ficar exposta. Este tipo de soluções pode ser uma boa alternativa a outras soluções mais tradicionais, porém a sua instalação deverá ser um processo bastante cauteloso na medida em que os pormenores construtivos têm grandes implicações no bom funcionamento da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço Dunar, Geossintéticos, Defesa Costeira, Modelação Física, Restinga

ABSTRACT

The portuguese coast, being very energetic, has shown along the years evidences of coast erosion. The region of Ofir is one of areas with tendency to degradate having had several interventions in the last few years. The existing sandbank provides the protection of the city of Esposende from the action of the sea, being for that reason necessary to take actions to assure its maintenance. In this sense, it has been proposed a structure of dune defense in geosynthetics cylinders. As this material has started being used since a relatively short time, this type of solutions arouses the interest of the engineers. In this work it is intended to go deeper into the knowledge of this material.

For that, a section of the sandbank has been studied using a physical model. Three series of tests have been carried out, in wave tank, all of them with the same water level (+4,0m ZH) and wave climate typical of the studied area (Hs=1.5-3,5 m and Tp=8-12 s). In the first series an outline of cylinders has been laced being the joints aligned. In the second one, due to the poor performance of the joints it was tried to reinforce the joints. In the last series, tests were made without any protection in the sandbank with the purpose of assessing its utility.

It was concluded that it is undeniable the necessity of taking actions for the maintenance of the sandbank or it runs the risk of disappearing and consequently the city of Esposende will be exposed. This type of solutions can be a good alternative to other more traditional solutions, however its setting-in should be a very cautious process in the way that the constructive details have large implications in the good functioning of the structure.

KEYWORDS: Dune Reinforcement, Geosynthetics, Coastal Protection, Physical Modelling, Sandbank

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS 1

1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE 2

2. GEOSSINTÉTICOS EM ENGENHARIA COSTEIRA 3

2.1. ENQUADRAMENTO 3

2.2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL E PROCESSOS DE FABRICO 4

2.2.1. Propriedades do Material 8

2.2.2. Funções 12

2.3. APLICAÇÃO EM ENGENHARIA COSTEIRA 13

2.3.1. Reforço de dunas e praias 13

2.3.2. Exemplos de Aplicação 14

2.3.3. Nota Final 149

3. CASO DE ESTUDO – RESTINGA DE OFIR 21

3.1. INTRODUÇÃO 21

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE INTERVENÇÃO 22

3.3. EVOLUÇÃO RECENTE DA RESTINGA E INTERVENÇÕES EFECTUADAS 23

3.4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO 26

3.5. NOTA FINAL 27

4. ASPECTOS DO DIMENSIONAMENTO 29

4.1. DIMENSIONAMENTO DOS GEOCILINDROS – ASPECTOS GERAIS 29

4.2. DIMENSIONAMENTO DOS GEOCILINDROS – RESTINGA DE OFIR 31

5. TRABALHO EXPERIMENTAL 33

5.1. ENQUADRAMENTO 33

5.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 33

5.2.1. Tanque de ondas 33

5.2.2. Sistema de geração de ondas 33

5.2.3. Sistema de medição de níveis hidrodinâmicos 34
5.2.4. Cilindros de geossintéticos 34
5.3. METODOLOGIA 35
5.3.1. Condições hidrodinâmicas no protótipo 35
5.3.2. Caracterização da solução proposta 36
5.3.3. Conceito de Semelhança 37
5.3.4. Morfologia do Modelo 38
5.3.5. Condições Hidrodinâmicas no Modelo 40
5.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 41
5.4.1. Construção do Modelo 41
5.4.2. Programa de Ensaios 44
5.5. RESULTADOS OBTIDOS 47
5.5.1. Restinga Protegida com Cilindros de Geossintéticos (Série I) 47
5.5.2. Restinga Protegida com Cilindros de Geossintéticos com reforço nas juntas (Série II) 49
5.5.3. Restinga sem Protecção (Serie III) 53
5.5.4. Análise Global de Resultados 55
5.5.5. Nota Final – Considerações acerca de modelos de fundos móveis 58
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 59
6.1. CONCLUSÕES 59
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. - Principais Funções dos Geossíntéticos 3

Figura 2.2. – Geo-têxtil 7

Figura 2.3. – Geo-grelha 7

Figura 2.4. – Geo-manta 7

Figura 2.5. – Geo-células 7

Figura 2.6. – Geo-membrana 7

Figura 2.7. - Geocomposto 7

Figura 2.8. - Planta do projecto de protecção e reforço da praia da Falésia (Fonte:Tencate Portugal) 14

Figura 2.9. - Colocação dos Geotube® (Fonte: Tencate Portugal) 15

Figura 2.10. - Aspecto final da obra (Fonte: Tencate Portugal) 15

Figura 2.11. - Situação em Janeiro de 1998, antes da intervenção 16

Figura 2.12. - Secção transversal do reforço dunas em colchões de areia embrulhados em geotêxteis 16

Figura 2.13. - Secção transversal da solução final: colchões de areia e cilindros de geossintéticos 17

Figura 2.14. - Aspecto geral da duna em Novembro de 2009 17

Figura 2.15. – Colocação dos sacos de areia na Estela 18

Figura 2.16. - Aspecto do cordão dunar da Estela em Dezembro de 2001 18

Figura 2.17. – Intervenção na praia de Mira 19

Figura 3.1. - Localização da Zona de Intervenção (Fonte: Google Earth) 21

Figura 3.2. - Vista panorâmica da restinga de Ofir 22

Figura 3.3. - Evolução do Corpo da Restinga (Fontes: INAG e Google Earth) 25

Figura 4.1.- Determinação do parâmetro β (Fonte: Das Neves (2011)) 30

Figura 5.1. - Dimensões dos cilindros utilizados (Fonte: Alves (2011)) 34

Figura 5.2. - Enchimento dos geocilindros ..... .35

Figura 5.3. - Comparação da direcção média anual com situações de temporal (dados do IH para o período 1993-2003, para a bóia ondógrafo do porto de Leixões) 36

Figura 5.4. - Perfil-tipo da restinga (Fonte: WW (2012)) 37

Figura 5.5. - Perfil transversal da restinga a construir em modelo (medidas em milímetros) 39

Figura 5.6. - Planta do modelo físico executado no tanque de ondas 39

Figura 5.7. - Limites de altura de onda máxima a reproduzir no tanque de ondas do LH-FEUP, em função do período de onda 41

Figura.5.8. - Evolução do processo de colocação da britano núcleo da restinga ..... .41

Figura 5.9. - Colocação da tela de geotêxti que estabelece o confinamento do núcleo. A areia foi colocada sobre esta tela 42

Figura 5.10. - Aspecto final do modelo de fundos móveis construído do LH 42

Figura 5.11. - Configuração dos cilindros no lado exposto do modelo..... 43

Figura 5.12. - Configuração dos cilindros no lado abrigado do modelo 43

Figura 5.13. - Aspecto geral do modelo para os ensaios da Série I..... 45

Figura 5.14. - Pormenor do desfasamento nas juntas ..... .45

Figura 5.15. - Aspecto geral do modelo para os ensaios da Série II..... 46

Figura 5.16. - Aspecto geral do modelo para os ensaios da Série III..... .46

Figura 5.17. - Estado da restinga após o 1º ensaio da Série I. a)zona exposta, b) zona da cabeça 47

Figura 5.18. - Estado da restinga após o 2º ensaio da Série I. a)zona exposta, b) extremidade restinga 48

Figura 5.19. - Estado da restinga, no lado abrigado após o 2º ensaio da Série I 49

Figura 5.20. - Estado da restinga após o final dos ensaios da Série I. a)pormenor da fossa de erosão nas juntas, b) vista geral sobre o lado exposto..... 49

Figura 5.21. - Estado da restinga, no lado exposto, após o 1º ensaio da Série II..... 50

Figura 5.22. - Pormenor da junta localizada na cabeça do lado exposto após o 1º ensaio da Série II 50

Figura 5.23. - Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. a)pormenor da junta localizada na cabeça do lado exposto, b) vista geral sobre o lado exposto 51

Figura 5.24. - Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. a)pormenor da junta na zona intermédia do lado exposto, b) pormenor do ravinamento do lado abrigado 51

Figura 5.25. - Estado da restinga durante o último ensaio da Série II. a)pormenor da junta localizada na cabeça do lado exposto, b) pormenor da junta da zona intermédia do lado exposto 52

Figura 5.26. - Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. a)vista geral sobre o lado exposto, b) assoreamento do lado abrigado 52

Figura 5.27. - Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. Pormenor do deslocamento do cilindro de base do lado abrigado..... 52

Figura 5.28. - Vista geral da restinga durante o 1º ensaio da Série III..... 53

Figura 5.29. - Vista panorâmica sobre a restinga durante o 1º ensaio da Série III 53

Figura 5.30. - Vista panorâmica sobre a restinga durante o 2º ensaio da Série III (cabeça 54

Figura 5.31. - Vista panorâmica sobre a restinga durante o 2º ensaio da Série III (enraizamento 54

Figura 5.32. - Vista geral sobre a restinga no final dos ensaios da Série III 55

Figura 5.33. - Vista geral sobre a restinga no final dos ensaios da Série III 55

Figura 5.34. - a)Fossa de erosão localizada na junta b) talude de erosão com configuração uniforme 56

Figura 5.35. - Deposição de areias nos cilindros com cota mais baixa do lado abrigado a)Final dos ensaios da Série I b) Final dos ensaios da Série II..... 57

Figura 5.36. -.Vistas panorâmicas do corpo da restinga a)Final dos ensaios da Série I; b) Final dos ensaios da Série II; c) Final dos ensaios da Série III..... 57

Figura 5.36. -. Perfis do modelo a) Início dos ensaios da Série I; b) Final dos ensaios da Série I; c) Final dos ensaios da Série III..... 58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. - Tipos de tecelagem dos geotêxteis..... 5

Quadro 2.2. - Características do material usado na praia da Falésia, Algarve (Fonte: Tencate..... 15

Quadro 3.1. - Intervenções efectuadas na restinga de Ofir (Fonte: Polis Litoral Norte..... 26

Quadro 4.1. - Condições de análise testadas por Van Steeg e Vastenburg (2010..... 31

Quadro 4.2. - Diâmetros mínimos calculados (Fonte: PLNL..... 31

Quadro 5.1. - Síntese das características hidrodinâmicas no protótipo (Fonte: Adaptado de Coelho, 2005..... 36

Quadro 5.2. - Escalas utilizadas no modelo..... 38

Quadro 5.3. - Volumes de areia (m3) associados a cada hipótese..... 39

Quadro 5.4. - Condições de agitação que viriam a ser reproduzidas no tanque de ondas..... 40

Quadro 5.5. - Resumo dos ensaios realizados em modelo reduzido e condições de agitação marítima a que foram expostos..... 44

ÍNDICE DE SÍMBOLOS ABREVIATURAS

WW – WW, Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.

CEN – Comissão Europeia de Normalização

TC – Comissão Técnica

ISSO – Organização Internacional de Normalização

PET – Poliésteres

PP – Polipropileno

PE – Polietileno

PEAD – Polietiliano de Alta Densidade

PEBD – Polietileno de Baixa Densidade

PA – Poliamidas

PVC – Polivinílico de Cloro

mm – milímetros

g/m^2 – gramas por metro quadrado, massa por unidade de área

ºC – grau centígrado

kPa – kiloPascal, força por unidade de área

K – coeficiente de permeabilidade

Q – caudal

L – comprimento

ΔH – perda de carga

Ψ – permeabilidade hidráulica

t – espessura

s – segundos

k_p – transmissividade transversal

$_A$ – Área

Θ - transmissividade hidráulica

kN/m – kiloNewton por metro, força por unidade de largura

% - percentagem

kN/m^2 – kiloNewton por metro quadrado, força por unidade de área

pH – potencial de hidrogénio

UV – ultra-violeta

m – metro

$l/min/m^2$ – litros por minuto por metro quadrado, permeabilidade

m^3 metro cúbico

$m^3/m/ano$ – metro cúbico por metro por ano

NW – Noroeste

SW – Sudoeste

EW – Este-Oeste

WSW – Oeste-Sudoeste

WNW – Oeste-Noroeste

IVA – Imposto sobre valor acrescentado

€ - euros

ZH – zero hidrográfico

ρ – massa volúmica

ρ_w – massa volúmica da água

Hs - altura de onda significativa

B – largura do cilindro

H - altura do cilindro

f - coeficiente de atrito

β - ângulo de colocação da estrutura

χ - factor de correcção associado à absorção das ondas.

D_n - diâmetro nominal do cilindro

ξ - factor associado à rebentação

α - declive da estrutura

L_{op} - comprimento da onda em águas profundas

V – vertical

H – horizontal

LH – Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto

Π – número Pi

d – profundidade

ϕ – diâmetro

cm – centímetro

aprox. - aproximadamente

1
1. Introdução

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVOS

O fenómeno da erosão costeira afecta profundamente a costa portuguesa. Esta temática tem suscitado preocupações às populações que ao longo das últimas décadas assistem ao recuo da linha de costa e vêem a sua segurança ameaçada. Para além dos agentes erosivos naturais já conhecidos (vento, marés, agitação marítima) existem outras causas que estão na origem do aumento dos processos erosivos, muitas delas antropogénicas. A subida do nível das águas do mar, o esgotamento das fontes sedimentares da plataforma terrestre, as alterações induzidas pela ocupação das zonas costeiras e consequente destruição de estruturas naturais, e a construção de estruturas portuárias, que alteram o processo natural de transporte de areias, estão na base da rápida degradação que se tem vindo a assistir.

A cidade de Esposende, sendo situada na costa oeste portuguesa, é uma cidade em risco, uma vez que a restinga localizada na sua frente, que constitui uma protecção natural à agitação marítima, corre o risco de se romper e deixar de desempenhar esta função, expondo a população e as estruturas existentes. Essa situação tem despoletado intervenções recentes de manutenção e reforço da restinga procurando salvaguardar a sua existência. Nesse sentido, foi desenvolvida pela empresa WW Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A (2012), na sequência de uma proposta de um grupo de trabalho, (Veloso Gomes *et al* 2011), uma solução de proteção da restinga, que tem a particularidade de utilizar uma tecnologia relativamente recente, o emprego de geossintéticos. Este material tem vindo a ser utilizado frequentemente e com sucesso noutros ramos da engenharia civil, o que motivou um grande e rápido desenvolvimento da indústria da sua produção. Porém, no ramo da engenharia costeira a sua aplicabilidade ainda é questionável. Assim, com esta dissertação pretende-se o aprofundamento do conhecimento em relação a este tipo de técnicas, que poderão constituir uma boa alternativa a outras mais tradicionais da engenharia civil, no domínio da defesa litoral.

Os objetivos propostos foram:

- Conhecer o material geossintético, suas características, funções e aspectos do seu dimensionamento.
- Testar a solução proposta, através da modelação física em tanque de ondas, avaliando a sua aplicabilidade e desempenho em situações de protecção costeira e, especificamente de reforço de uma restinga

1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente tese está dividida em seis capítulos, a saber:

- O primeiro é o capitulo introdutório, onde são descritos os objectivos da dissertação;
- No segundo capítulo são apresentados conceitos acerca do material usado no reforço dunar, os geossintéticos, e suas características e condicionalismos. Neste capítulo são também apresentados casos reais, em Portugal, onde a mesma técnica foi aplicada.
- O terceiro capítulo descreve a situação da cidade de Esposende, que tem vindo a ser ameaçada ao longo dos anos por fenómenos de erosão costeira e para a qual está destinada a intervenção estudada.
- No capítulo quatro são apresentadas as formulações matemáticas normalmente utilizadas em obras de geossintéticos.
- No quinto capítulo são descritos os procedimentos e metodologias laboratoriais que permitiram a modelação física da solução preconizada no projecto em questão. Neste capítulo são também apresentados, ilustrados e comentados, os resultados obtidos.
- Por último, o sexto capítulo destina-se ao registo das considerações finais, bem como à apresentação de algumas propostas para estudos posteriores.

2

2. Geossintéticos em Engenharia Costeira

2.1. ENQUADRAMENTO

Um geossintético é um material natural, sintético ou polímerico, usado em contacto com materiais, como solo ou rocha, em aplicações de engenharia civil. A sua utilização emergiu nas últimas décadas ao mesmo tempo que o recurso a produtos baseados em fibras naturais (lã, algodão, seda) foi diminuindo, devido à sua biodegrabilidade e pouca adaptabilidade aos vários tipos de aplicações. As matérias primas utilizadas no fabrico dividem-se em dois grupos: naturais e químicas, no entanto, como foi referido, as fibras naturais não apresentam as características necessárias pelo que raramente são utilizadas. Por outro lado, a natureza sintética dos produtos torna-os próprios para uso em obras de vários tipos (viárias, hidráulicas, de fundação, etc). Os geossintéticos vêm cada vez mais desempenhando uma ou mais das seguintes funções: reforço, filtração, drenagem, protecção, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial (Figura 2.1.). A grande aceitação deste tipo de material deve-se sobretudo ao seu baixo custo, à disponibilidade elevada, à facilidade de manuseamento e instalação e ao impacte ambiental pouco significativo. A aplicação dos geossintéticos no ramo da engenharia civil é recente, tendo-se iniciado na década de 60, com o desenvolvimento dos geotêxteis tecidos Desde então, vem apresentando um crescimento contínuo, em especial nos últimos anos.

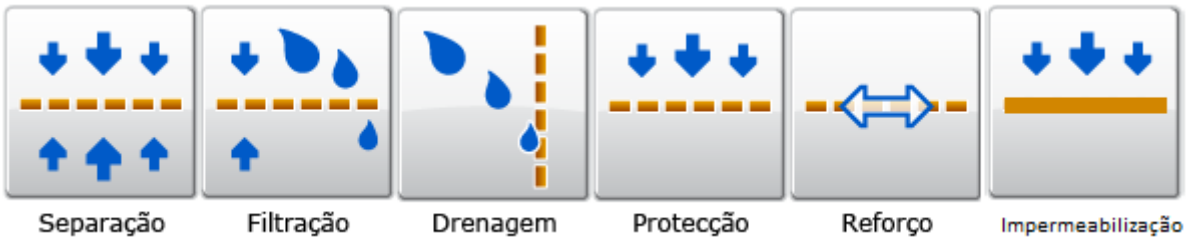


Figura 2.1. - Principais Funções dos Geossíntéticos (Fonte: Ipetex.com)

Neste capítulo, será feita referência às principais características dos materiais geossintéticos e aos processos de fabrico. O desenvolvimento dos ensaios de caracterização destes materiais é recente mas, tal como em qualquer tipo de actividade existem organismos de normalização nacionais, europeus e internacionais. No CEN (Comissão Europeia de Normalização), a normalização na área dos geossintéticos é tratada pela comissão técnica (TC) 189 (CEN TC 189); esta comissão foi criada em 1989, sendo designada, desde dezembro de 1999, por "Geossintéticos" (em substituição da anterior designação "Geotêxteis e produtos relacionados"). O objectivo do CEN TC 189 é o desenvolvimento de normas: de exigências dos geossintéticos para as várias aplicações específicas; de ensaios para quantificar as propriedades especificadas nas normas das exigências; com termos, definições e

símbolos relativos aos geossintéticos; com recomendações para a selecção, para aplicações e para ensaios de geossintéticos. Entre os organismos de normalização internacionais, inclui-se a ISO (Organização Internacional de Normalização). A ISO consiste numa rede de organismos de normalização nacionais de 148 países; os geossintéticos são tratados na TC 221 com a designação de "Geossintéticos". Algumas normas do CEN são adoptadas pela ISO (e vice-versa) no âmbito do Tratado de Viena. Em trabalhos anteriores, nomeadamente, Carneiro, (2009), das Neves (2011) ou Lopes e Pinho Lopes (2010), apresenta-se uma vasta lista dessas normas referentes às exigências dos geossintéticos em função da sua aplicação. Nesta secção da dissertação serão apenas abordadas algumas das suas propriedades, consideradas mais relevantes.

Serão também apresentadas algumas obras onde se optou por soluções utilizando este tipo de material.

2.2. CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL E PROCESSOS DE FABRICO

Desvalorizando a existência de geossintéticos de origem natural, dada a sua aplicabilidade bastante baixa, serão descritos os materiais e processos de fabrico associados aos geotêxteis sintéticos.

O plástico é a principal matéria prima dos geossintéticos. São materiais orgânicos, poliméricos sintéticos formados através de reacções químicas. Carneiro (2009), na sua dissertação, fez uma descrição bastante completa de todos os processos químicos envolvidos na produção do polímero pelo que se recomenda a sua leitura no sentido de compreender a sua complexa estrutura molecular.

Na fabricação dos plásticos são vários os polímeros utilizados, sendo os mais comuns indicados por das Neves, 2003:

- Poliésteres (PET)
- Polipropileno (PP)
- Polietileno (PE), principalmente:
  - Polietileno de Alta Densidade (PEAD)
  - Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)
- Poliamidas (PA)
- Polivinílico de Cloro (PVC)

Associadas a cada um dos polímeros constituintes dos plásticos estão diferentes propriedades físicas e mecânicas. Estudos demonstraram que o poliéster é o polímero mais resistente e menos deformável, logo seguido das poliamidas. O polipropileno e polietileno de alta densidade apresentam características idênticas de resistência e deformação enquanto o polivinílico de cloro é o polímero menos resistente e mais deformável. Também foi constatado que os poliésteres são os que evidenciam melhor comportamento ao longo do tempo e que os polipropilenos e os polietilenos mostraram boa resistência aos ácidos orgânicos. As propriedades finais do geossintético estão directamente relacionadas com a composição química e a estrutura do polímero. As poliefinas, que englobam os polímeros polietileno e polipropileno, são facilmente inflamáveis, apresentando grande deformação na ruptura e baixa resistência à fluência. Os poliésteres possuem elevado módulo de elasticidade e apresentam baixa susceptibilidade à fluência.

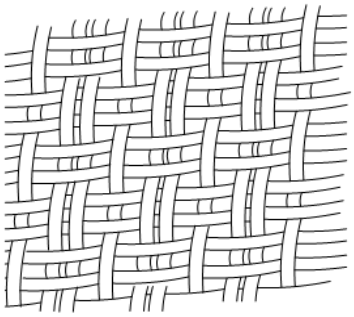
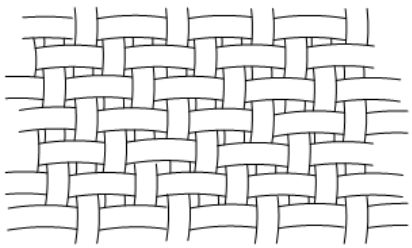
Os polímeros sintéticos são produzidos através de reações químicas, denominadas polimerizações. A polimerização pode ocorrer de variadas formas mas, de uma forma geral, tais reacções consistem na ligação química repetitiva de moléculas individuais, os monómeros constituídos por átomos de

carbono e hidrogénio. Combinações variadas de calor, pressão provocam a alteração das ligações químicas que prendem os monómeros, levando-os a estabelecer ligações uns com os outros. O resultado final destas reações apresenta-se sob a forma granular ou esférica.

A partir de um mesmo monómero é possível obter polímeros com propriedades distintas, caso sejam utilizados diferentes tipos de aditivos químicos no processo de polimerização. Os aditivos são introduzidos com o objectivo de melhorar os processos de fabricação ou de modificar aspectos do comportamento do polímero básico. Os aditivos mais vulgarmente utilizados são os estabilizantes térmicos, os anti-UV e os antioxidantes.

O passo seguinte é a produção dos geotêxteis, produtos de fibras sintéticas, flexíveis e pouco espessas. Nesta fase, o polímero é derretido e, utilizando processos de extrusão ou fiação contínua, obtêm-se os componentes mais comuns: filamento contínuo circular, tira plana contínua, fios ou folha de película. Os geotêxteis tecidos são fabricados por processos convencionais de tecelagem, que tramam estes componentes em duas direcções perpendiculares entre si. Os geotêxteis tecidos formam uma estrutura planar, que apresenta uma distribuição de poros relativamente regular. O entrelaçamento das fibras apresenta forma variada de acordo com o tipo de tecelagem. No quadro 2.1. estão indicados e ilustrados os 3 tipos de geotêxtil tecido.

Quadro 2.1. – Tipos de tecelagem dos geotêxteis (Fonte: IGS Brasil)

Tipo de Tecelagem	Exemplo
Geotêxtil tecido a partir de filamentos únicos (monofilamento)	
Geotêxtil tecido a partir de filamentos múltiplos (multifilamento)	
Geotêxtil tecido a partir de fitas	

A espessura dos geotêxteis tecidos fabricados a partir de mono e multifilamentos varia entre 1,0 mm e 2,0 mm. Esta espessura é superior à dos geotêxteis tecidos obtidos a partir de fitas, geralmente inferior a 0,5 mm.

Os geotêxteis do tipo não tecido são constituídos por monofilamentos, com um arranjo aleatório dos mesmos. Os geotêxteis não tecidos são fabricados dispondo os componentes aleatoriamente, numa trama solta. Na fabricação, os filamentos são espalhados aleatoriamente sobre uma esteira rolante, ficando a espessura do produto condicionada à velocidade de avanço da esteira. Os componentes são posteriormente ligados, obtendo-se uma estrutura planar, formada pela ligação dos fios ou filamentos, por meio de um dos seguintes processos:

- Processo mecânico: utiliza a agulhagem para o entrelaçamento dos filamentos. Os geotêxteis ligados por esse processo são conhecidos como geotêxteis não tecidos agulhados.
- Processo térmico: a aplicação de calor fornece coesão ao conjunto com a fusão dos elementos nos seus pontos de contacto, obtendo os chamados geotêxteis não tecidos termo ligados ou termo soldados. Estes geotêxteis são relativamente finos, variando a sua espessura entre 0,5 mm e 1,0 mm.
- Processo químico: fornece uma ligação adicional pela aplicação de uma resina acrílica. Neste caso, os produtos obtidos são denominados geotêxteis não tecidos ligados quimicamente. Usualmente, o processo químico sucede a agulhagem. A sua espessura varia entre 0,5 e 3 mm.

O ramo dos geossintéticos esta em constante evolução e hoje em dia é possível encontrar não só geotêxteis na sua forma simples, mas também uma vasta gama de produtos compostos. Actualmente, os mais usuais são:

- Geogrelhas - possuem estrutura em forma de grelha, com malha rectangular ou quadrada e o seu uso é predominantemente estrutural, como reforço de estruturas de solo.
- Geomantas - têm estrutura tridimensional, ou seja, a espessura é relativamente grande, ao contrário dos geotêxteis e apresentam cerca de 90% de vazios na sua estrutura. A sua principal aplicação é a protecção superficial do solo contra a erosão. Devido a sua forma de aplicação, as geomantas são confeccionadas com materiais com grande resistência às intempéries e à fotodegradação.
- Geocompostos - são os produtos compostos por dois ou mais geossintéticos. O mais comum é fabricado com duas camadas de geotêxtil com uma geomanta entre eles. O seu uso mais comum é em sistemas de drenagem.
- Geocélulas - apresentam-se em painéis com estrutura tridimensional composto por um conjunto de células contíguas com formato semelhante à de um favo de mel. As células podem ser preenchidas com areia, brita, betão dependendo do fim a que se destinam.
- Georredes - possuem estrutura tridimensional com grande volume de vazios. Sua principal aplicação é em drenagem, pois consegue propiciar grandes vazões apesar da pequena seção transversal. É comum seu uso em conjunto com outros geossintéticos formando os geocompostos.
- Geomembranas – apresentam excelente performance quando utilizada como revestimento impermeabilizante. Os tipos mais encontrados são as de polietileno de alta densidade (PEAD) e as de polivinílico de cloro (PVC). As geomembranas são muito utilizadas em canais, barragens, aterros sanitários, entre outras.

Figura 2.2. – Geo-têxtil

Figura 2.3. – Geo-grelha

Figura 2.4. – Geo-Manta.

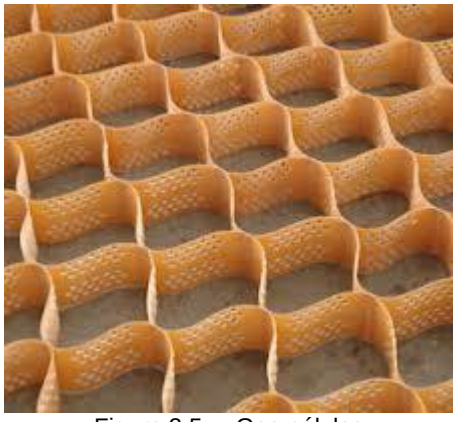


Figura 2.5. – Geo-células

Figura 2.6. – Geo-membrana

Figura 2.7. – Geocomposto

2.2.1. PROPRIEDADES DO MATERIAL

2.2.1.1. Propriedades Físicas

A caracterização do produto e o controle de qualidade são conseguidos através das suas propriedades físicas. As principais propriedades físicas dos geossintéticos são a gramagem, a espessura e a densidade relativa dos polímeros que os compõem.

Massa por unidade de área

Exprime-se em g/m^2. Os valores usuais desta grandeza situam-se entre 100 e 300 g/m² para os geotêxteis tecidos, 100 e 400 g/m² para os geotêxteis não tecidos e entre 200 e 1000 g/m² para as geogrelhas. (das Neves, 2003)

Densidade relativa dos polímeros

É definida pela razão entre o peso volúmico dos elementos constituintes do geotêxtil e o peso volúmico da água a 4ºC.

Os valores típicos de densidade relativa dos polímeros são: 0,91 para o polipropileno; 1,69 para o polivinílico de cloro; 1,22 a 1,38 para o poliéster; 1,05 a 1,14 para a poliamida e 0,90 a 0,96 para o polietileno. (Lopes e Pinho Lopes, 2010)

Espessura

A espessura nominal é definida como a distância entre as superfícies inferior e superior do geossintético, medida para uma dada pressão (normalmente 2 kPa). Geralmente, o valor desta grandeza situa-se entre os 0,2 e 5 mm para os geotêxteis não tecidos e 0,2 a 1,5 mm para os geotêxteis tecidos.

2.2.1.2. Propriedades Hidráulicas

Distribuição e dimensão das aberturas

A distribuição e dimensão das aberturas são fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros e separadores. Os geotêxteis, tecidos ou não-tecidos, possuem um intervalo de tamanhos de abertura e não um tamanho único. A representação desse intervalo assemelha-se à utilizada para representar a forma granulométrica de um solo. O intervalo varia de 0,06 a 0,15 mm para os geotêxteis não tecidos e de 0,05 a 1,50 mm para os geotêxteis tecidos

Permissividade

Quando o geotêxtil trabalha como um elemento de filtro é necessário conhecer sua permeabilidade na direcção normal ao plano do geossintético.

A permeabilidade de um material poroso submetido a um fluxo laminar é definida pela lei de Darcy (Eq. 2.1.)

$$K = \frac{Q.L}{\mathrm{A}\ .\Delta \mathrm{H}} \qquad (2.1.)$$

Onde K é o coeficiente de permeabilidade, Q é o caudal que passa através de um material de área A, por um comprimento L, e cuja resistência ao fluxo laminar provoca uma perda de carga total igual a ΔH

A permissividade hidráulica (ψ), expressa em s^{-1}, é definida por:

$$\psi = \frac{Q}{A \,.\Delta H} \qquad (2.2.)$$

Pode obter-se a permeabilidade normal a uma manta têxtil de espessura t, através da expressão:

$$k_n = \psi \,.\, t \qquad (2.3.)$$

A permissividade depende da distribuição e dimensão das aberturas e normalmente apresente valores entre os 0,05 e 0,5 s^{-1} em geotêxteis tecidos e entre 0,2 e 2,5 s^{-1} para os não tecidos.

Transmissividade

A transmissividade de um geotêxtil indica a capacidade que este possui de conduzir água no seu próprio plano.

Considerando uma situação de fluxo laminar, da lei de Darcy (Eq. 2.4.) temos:

$$Q = \frac{k_p \,.\Delta H \,.A}{L} \qquad (2.4.)$$

Onde k_p representa a transmissividade transversal.

Reescrevendo esta equação em função da espessura t do geotêxtil, temos:

$$k_p = \frac{Q}{\Delta H} \,.\frac{1}{t} \qquad (2.5.)$$

Sendo que a transmissividade hidráulica (Θ) é definida pela relação (Eq. 2.6.):

$$\theta = \frac{Q}{\Delta H} \qquad (2.6.)$$

Assim,

$$\theta = k_p \,.t \qquad (2.7.)$$

É de salientar que a interacção solo-geotêxtil pode ter grande influência sobre a transmissividade hidráulica do sistema. Portanto, além dos ensaios de caracterização do geotêxtil devem ser realizados ensaios de desempenho considerando o conjunto.

2.2.1.3. Propriedades Mecânicas

Em praticamente todos os tipos de aplicações geotécnicas, os geossintéticos estão sujeitos a solicitações mecânicas, seja na fase de instalação e construção, seja durante a vida útil da obra. Durante a fase de instalação, as principais propriedades associadas às solicitações mecânicas são: resistência à tração, ao punçoamento e ao atrito na interface solo-geossintético. Durante a vida útil, destacam-se a resistência ás radicações ultravioleta, acções da temperatura, á oxidação e a agentes químicos.

Comportamento à tracção

O comportamento de um geossintético em solicitações de tração depende de vários factores, tais como: tipo de polímero constituinte, estrutura, processo de fabricação, entre outros.

A resposta dos geossintéticos quando sujeitos à tração é caracterizada pela relação entre a força por unidade de largura (expressa em kN/m) e a deformação longitudinal (expressas em %). A partir desta relação, pode-se obter o módulo de rigidez, a resistência à tração e a deformação na ruptura.

Resistência ao punçoamento

Os geossintéticos, quando aplicados em obras geotécnicas, podem sofrer descontinuidades, provenientes de uma perfuração ou de um efeito de compressão localizada (punçoamento).

A resistência ao punçoamento é definida com base na medição da vulnerabilidade dos geossintéticos a compressões diferenciais ou a choques provocados pela queda de materiais. A solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica.

Atrito nas interfaces

As propriedades mecânicas de interacção entre o solo e o elemento de reforço são factores importantes para o projecto de estruturas em solo reforçado. A caracterização dessa interacção é feita com base na resistência ao corte da interface entre o geossintético e o material de contacto. Em geral, é expressa em kN/m^2

2.2.1.4. Durabilidade

O mecanismo de degradação predominante, para a maioria dos materiais poliméricos, é a quebra das ligações moleculares. Este mecanismo consiste na rotura das ligações químicas com consequente redução do comprimento das cadeias moleculares e diminuição do peso molecular. As alterações referidas provocam mudanças significativas na estrutura do polímero e das propriedades do material, maioritariamente na sua resistência e extensão.

Note-se que a presença de aditivos na composição dos plásticos é fundamental para as questões de durabilidade dado que na presença deles os efeitos degradantes poderão ser minimizados.

Os principais mecanismos de degradação dos geotexteis são: a degradação térmica, a degradação por fluência, a degradação química, a degradação por efeito dos agentes atmosféricos e a danificação durante a instalação.

Degradação térmica

O aumento da temperatura funciona como catalisador das reacções químicas sendo que a degradação dos polímeros é favorecida por esse factor. A presença de oxigénio conjugada com esse aumento provoca a degradação termo-oxidativa. Das Neves (2003), com base em estudos de Santos *et al.*

(2002) e Pilarczyk (2000), conclui que os polímeros menos sensíveis à variação da temperatura são as poliamidas e os poliésteres, sendo o polietileno e o polipropileno os mais sensíveis à sua alteração.

A intensidade da degradação depende da concentração de oxigénio em contacto com o polímero sendo este efeito menor quando este se encontra submerso em água.

Fluência

A fluência pode ser definida como o aumento da deformação sob tensão constante. Os materiais poliméricos são sujeitos à fluência, ou seja, estes materiais podem sofrer alterações nas propriedades mecânicas ao longo do tempo.

Matérias-primas tais como o poliéster e a poliamida apresentam baixa susceptibilidade à fluência, enquanto o polipropileno e o polietileno apresentam maior susceptibilidade

Danificação durante a instalação

As propriedades mecânicas de interacção entre o solo e o elemento de reforço são factores importantes para o projecto de estruturas em solo reforçado. A danificação durante a instalação resulta essencialmente de operações de instalação e manuseamento que podem resultar, por exemplo, em defeitos locais e/ou alterações das propriedades dos geossintéticos. Naturalmente, este mecanismo de degradação dependerá não só do polímero constituinte e da estrutura do material mas também das características dos materiais adjacentes e da energia de compactação, no caso dos solos.

Lopes *et al*. (2001) fizeram estudos para aferir a influência da energia de compactação e do tipo de solo na danificação durante a instalação. Foi concluído que os solos com dimensão média de partículas menor induzem menor danificação nos geotêxteis durante a construção e que a resistência a essa danificação aumenta com a resistência à tracção do material geossintético.

Degradação química

O contacto com agentes como o oxigénio, iões metálicos, ácidos, bases e solventes e da água poderão provocar alterações nas estruturas moleculares dos polímeros e consequentemente alterar as suas propriedades.

Na presença de água os polímeros poderão ser vítimas da hidrólise, uma reacção química irreversível que conduz à rotura das cadeias moleculares. À temperatura ambiente as reacções de hidrolise ocorrem de forma lenta, porém poderão ser catalisadas na presença de iões metálicos, com o aumento da temperatura e humidade relativa do meio. O efeito destas reacções é a diminuição do peso molecular do polímero e a consequente redução de resistência.

No caso específico das poliamidas, o contacto com soluções com pH baixo tem consequências severas.

Agentes atmosféricos e foto-oxidação

Quando os geossintéticos estão expostos aos agentes atmosféricos, isto é, à acção da luz solar, da chuva, da temperatura ou do oxigénio, ocorre degradação. Este tipo de degradação deve-se sobretudo ao efeito combinado da água e da radiação ultravioleta presente na luz solar.

Lopes *et al*. (2001) realizaram ensaios sobre a acção destes agentes em geotêxteis não tecidos, constituídos por diferentes materiais com ou sem aditivos anti-UV. Foi verificado que quando o polímero constituinte é o polipropileno (PP), a existência de aditivos anti-UV é determinante na resistência dos geotêxteis aos agentes atmosféricos. No entanto, o geotêxtil sem aditivos anti-UV em PET evidencia resistência semelhante à do geotêxtil em PP com aditivos anti-UV para períodos de exposição iguais ou superiores a 15 semanas, tornando clara a maior resistência aos agentes

atmosféricos do poliéster. Os geotêxteis com filamentos curtos termoligados revelaram mais sensibilidade face aos agentes atmosféricos do que qualquer outro geotêxtil testado.

2.2.2. FUNÇÕES

2.2.2.1. Drenagem

As propriedades hidráulicas dos geotêxteis permitem a drenagem do excesso de água existente na estrutura construída. A drenagem do sistema solo-geossintético permite que o fluxo ocorra de forma adequada, sem perda de solo, dentro do plano do geossintético. Assim, a transmissividade é uma das propriedades mais importantes.

No entanto, é necessário ter alguns cuidados para garantir o bom funcionamento do sistema. Deve-se evitar a entrada de partículas sólidas no sistema, o que implica uma escolha acertada da dimensão das aberturas e ser cauteloso em relação à escolha do material, especificamente em termos de espessura e compressibilidade, no sentido de escolher um dreno adequado ao tempo de vida útil da obra.

2.2.2.2. Filtragem

A filtração é a interacção do solo com o geotêxtil que permite o fluxo de líquido, sem perda de solo, na direcção normal ao plano do geotêxtil ao mesmo tempo que proporciona a retenção do solo. Permite reter os finos mantendo o escoamento da água sem que ocorra colmatação, aumentando a longevidade da construção.

Os geotêxteis, nestes casos, devem ser colocado entre os vários níveis da construção para prevenir a mistura das várias camadas existentes de materiais permitindo, no entanto, a passagem de água através da sua estrutura. Assim, diminuem-se os custos de manutenção.

2.2.2.3. Separação

A separação obtém-se com a colocação de um material geossintético flexível, entre os materiais de diferente granulometria de modo que a integridade e funcionamento de ambos os materiais possam permanecer intactas ou mesmo ser melhorada.

A colocação de geotêxteis permite um aumento na resistência, uma maior estabilidade das camadas e a redução de espessura das mesmas diminuindo assim os custos de execução da obra.

2.2.2.4. Reforço

As propriedades mecânicas dos geotêxteis melhoram as propriedades mecânicas do solo.Quando os geotêxteis desempenham esta função é importante que exibam resistência á tracção, deformabilidade e flexibilidade apropriadas bem como bom comportamento á fluência e relaxação.A sua aplicação ajuda a prevenir o desabamento de paredes verticais e taludes de grande inclinação ou, no caso da construção de estruturas sujeitas a grandes cargas, o geotêxtil actua como agente de absorção e distribuição das mesmas.

2.2.2.5. Protecção

Esta função é obtida quando o geossintético é colocado entre dois materiais com o objectivo de impedir, ou minimizar, danos no material adjacente, absorvendo e distribuindo as tensões e

deformações transmitidas. O geossintético poderá ser colocado à superfície, de forma a proteger determinado material de acções exteriores, ou entre dois materiais, protegendo-os mutuamente das acções que um posso exercer sobre o outro.

2.2.2.6. Nota final

Como já foi referido, a caracterização das características dos geotêxteis, bem como os seus principais mecanismos de degradação, ainda não é consensual, devido ao facto de as soluções de engenharia que utilizam este tipo de produtos serem recentes. Assim sendo, cabe aos projectistas assumirem para si a responsabilidade técnica do projecto, devendo estes sentirem-se livres para determinar o que é relevante tecnicamente, como os parâmetros de projecto devem ser obtidos e os controlos devem ser efectuados. Naturalmente haverá uma relação entre as propriedades de cada tipo de produto geossintético e a função a que se destina.

No capítulo específico da Engenharia Costeira, a selecção do geossintético mais conveniente resulta de um exercício de ponderação onde devem ser tidos em conta todos os condicionalismos associados ao local da implantação, no sentido de definir quais as características mais importantes, para que as funções a que se destinam sejam desempenhadas com sucesso.

2.3. APLICAÇÃO EM ENGENHARIA COSTEIRA

2.3.1. REFORÇO DE DUNAS E PRAIAS

As dunas que margeiam a paisagem costeira servem a um propósito prático de valor inestimável. Elas agem como uma barreira resiliente às forças destrutivas das ondas e do vento, protegendo aglomerados populacionais e outras estruturas localizadas na sua envolvente.As praias e as dunas são partes integrantes de um ciclo dinâmico no qual a areia é constantemente trocada. Absorvem o impacto de tempestades de alta energia, impedindo ou atrasando a intrusão de águas em zonas do interior. Praias e as dunas são partes integrantes de um ciclo dinâmico no qual areia é constantemente trocadas. Durante tempestades muito energéticas, as ondas mobilizam a areia, promovendo o colapso da duna em direcção ao mar. Por outro lado, climas de agitação mais brandos provocam o transporte das areias para o corpo das dunas, fazendo com que estas se reconstruam novamente. Assim, pode dizer-se que as dunas constituem a defesa mais eficiente e menos dispendiosa contra a erosão costeira.

No entanto, a perda de vegetação, que retêm e mantêm a areia, torna as dunas e a praia mais susceptíveis à erosão eólica e hídrica. As actividades humanas, tais como a construção e o pisoteio, aumentam exponencialmente essa destruição da cobertura vegetal e, consequentemente, perda de areia. Assim, é natural que existam cada vez maiores preocupações de manutenção, protecção, valorização e reabilitação dos sistemas dunares. Exemplos disso são a plantação de vegetação nos maciços dunares, com o objectivo de diminuir o transporte de areias, a construção de passadiços sobreelevados e de vedações que impeçam o pisoteio e destruição da vegetação, a construção de paliçadas de modo a favorecer a acumulação de areias e também o enchimento artificial de praias e recomposição de dunas. (Das Neves, 2003).

Há necessidade de encontrar soluções para combater a degradação dos sistemas dunares e os geossintéticos são um recurso credível para tal. Tubos e sacos de geotêxtil cheios com areia, enterrados ou à superfície, representam um elemento de confiança para reforçar as dunas e proteger as áreas costeiras contra a acção directa do mar, ao mesmo tempo que não implicam que o interesse

paisagístico desvalorize. Para além disso, o impacte ambiental e visual provocado por estes, apesar de ser uma questão muito subjectiva, considera-se baixo.

Cada vez mais, em todo o Mundo, existem exemplos de casos de sucesso da aplicação destes materiais, mas em Portugal o uso destas técnicas ainda é relativamente recente. Deste modo, nesta secção da dissertação são apresentados alguns exemplos do que já foi feito no nosso país.

2.3.2. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

2.3.2.1. Construção de uma estrutura de protecção de um bar de praia – Albufeira, Algarve

O Pine Cliffs Resort é um empreendimento luxuoso localizado em Albufeira, Algarve, no sul de Portugal, sendo a praia adjacente um dos seus atractivos turísticos. Tal como vem acontecendo em diversas praias portuguesas também esta praia sofre com o avanço do mar e consequente erosão da praia, havendo uma redução considerável do seu areal ao longo dos anos. Neste local em específico o mar avançou de tal forma que atingiu o bar de praia, levando a areia que lhe servia de apoio. Assim, foi necessário tomar medidas, não só por motivos de segurança, mas também para evitar o desaparecimento da praia. A solução encontrada consistiu na construção de uma estrutura de protecção em cilindros fabricados com materiais geossintéticos, com o objectivo de provocar uma retenção frontal, para que se mantenha uma plataforma de areal com equipamentos balneares. A estrutura foi concebida de modo a aguentar as solicitações marítimas, já que está sujeita à acção directa da ondulação.

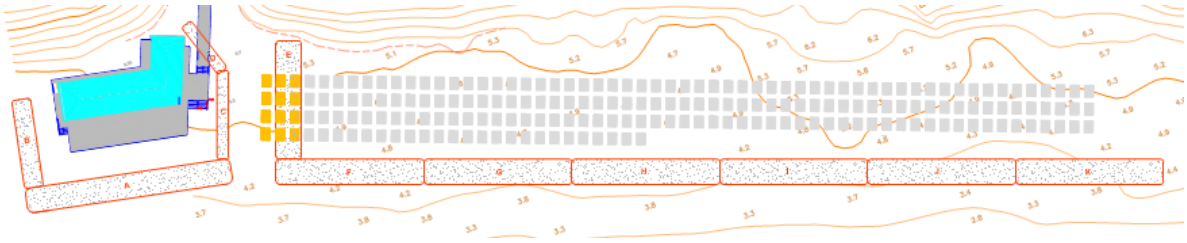


Figura 2.8. – Planta do projecto de protecção e reforço da praia da Falésia (Fonte:Tencate Portugal)

Na figura 2.2. encontra-se a planta associada à obra referida, onde se podem ver duas zonas distintas: uma extensão de praia de 125 metros e uma zona de protecção ao bar de praia. Foram utilizados 3 tipos de tubos:

- Tubo com uma altura útil de 2,00 metros após enchimento, diâmetro aproximado do tubo de 3,25 m e comprimentos de 31 e 25 metros
- Tubo com uma altura útil de 1,00 metros após enchimento, diâmetro aproximado do tubo de 1,60 m e comprimentos de 13 metros;
- Tubo com uma altura útil de 1,00 metros após enchimento, diâmetro aproximado do tubo de 1,60 m e comprimentos de 19 metros;

O tipo de cilindros utilizados foi o TenCate Geotube® 1000 MB (Figura 2.3.), constituído por multifilamentos de polipropileno tecidos, cujas propriedades se apresentam no quadro 2.2.. Os tubos foram cheios no local, após seu posicionamento na vala de colocação, cujo fundo deve ser

perfeitamente regular. O enchimento fez-se através da bombagem de areias por via húmida, utilizando bombas com capacidade para caudal sólido.

Quadro 2.2. - Características do Material Usado na Praia da Falésia, Algarve (Fonte: Tencate)

Material Base	PP Tecido
Dimensão das Aberturas	0.60 mm
Permeabilidade	813 l/min/m^2
Gramagem	949 g/m^2
Força de tracção máxima	
Transversal	180 kN/m
Longitudinal	180 kN/m

Figura 2.9. - Colocação dos Geotube® (Fonte: Tencate Portugal)

O conjunto de fotografias apresentadas na figura 2.4., tiradas 6 meses após a conclusão da obra, demonstram que os resultados foram satisfatórios e que o impacte visual, uma das principais preocupações em obras deste tipo, é nulo. No entanto, já foi realizada pelo menos uma operação de reposicionamento de areias para cobrir os cilindros após marés vivas.

Figura 2.10. - Aspecto final da obra (Fonte: Tencate Portugal)

2.3.2.2. Recuperação do sistema dunar de Leirosa

A implantação de um emissário submarino de efluentes industriais de duas empresas, produziu alterações na dinâmica e estrutura do sistema dunar da Leirosa. No entanto, os efeitos de erosão eram já sentidos neste local, devido à retenção de sedimentos no porto da Figueira da Foz, a norte da zona afectada, agravados localmente pelos diversos esporões neste troço de costa, incluindo o da Leirosa.

Figura 2.11. - Situação em Janeiro de 1998, antes da intervenção (Fonte: Antunes do Carmo *et al*. 2009)

Após uma tentativa falhada de reconstrução da duna, utilizando apenas o movimento de sedimentos, a solução encontrada foi a construção de uma estrutura de protecção, em geossintéticos precedido de acções de reconstrução da duna utilizando colchões de areia embrulhados em geotêxtil, reposicionamento de areias e de revegetação com plantas com características de fixação de areias. O reforço e protecção foram aplicados num comprimento total de 120 m ao longo da costa.

Em Fevereiro de 2005 foram aplicados os colchões de areia, técnica que nunca havia sido aplicada em Portugal, cada um com 6,4 m de comprimento, 3,2 m de largura e 0,825 m de altura, cheios com a areia disponível no local e dispostos em 8 camadas. A estrutura foi coberta com uma camada de 1 m de areia.

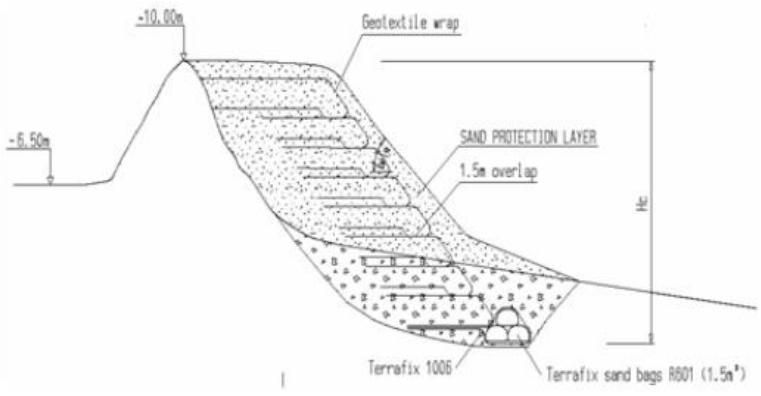


Figura 2.12. - Secção transversal do reforço dunar em colchões de areia embrulhados em geotêxteis (Fonte: Antunes do Carmo *et al*. 2009)

Porém, as forças hidrodinâmicas associadas ao Inverno seguinte afectaram a duna, conduzindo à abertura de algumas das camadas e consequente perda de areia. Para além disso, as duas primeiras

camadas de colchões ficaram expostas. Para combater esta situação, em Julho 2008, foram colocados na zona frontal da duna cilindros de 20 m de comprimento e 1,6 m de diâmetro, tal como ilustrado na figura 2.12. .

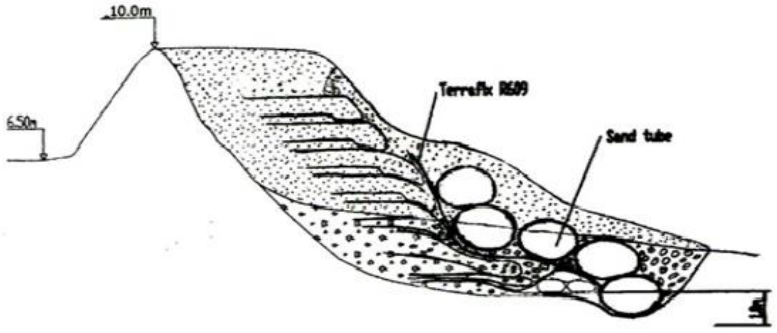


Figura 2.13. - Secção transversal da solução final: colchões de areia e cilindros de geossintéticos (Fonte: Antunes do Carmo *et al*. 2009)

Apesar desta última solução, ter demonstrado um bom comportamento, em Dezembro de 2008, as tempestades provocaram uma grande erosão na praia, deixando os cilindros completamente expostos, tendo havido necessidade de proceder a obras de reparação. Tal facto, relembra o carácter imprevisível deste tipo de soluções, ainda pouco conhecidas mas em constante desenvolvimento. Ainda assim, de uma maneira geral, a estrutura apresenta um comportamento satisfatório.

Figura 2.14. - Aspecto geral da duna em Novembro de 2009

2.3.2.3. Controlo de erosão no cordão dunar adjacente ao campo de golfe da Estela

A região têm vindo a assistir a fenómenos de erosão costeira, tendo sido alvo, desde 1997, de intervenções (ripagem mecânica de areias, colocação de paliçadas de madeira e pequenos sacos de areia) que tinham como objectivo combatê-los. Em Dezembro de 2000, e após 6 intervenções que não apresentaram o comportamento desejado, decide-se optar por uma nova técnica de defesa costeira que consistiu no reforço do talude reconstruído por ripagem mecânica de areias com uma tela de geotêxtil e sacos cheios com areia de 1 m^3 (figura 2.15.) intervenção foi efectuada em 3 troços de 350, 70 e 50m. O resultado final apresenta-se na figura 2.16.

Figura 2.15. – Colocação dos sacos de areia na Estela (Fonte: das Neves, 2003)

Figura 2.16. Aspecto do cordão dunar da Estela em Dezembro de 2001 (Fonte: das Neves, 2003)

2.3.2.4. Intervenção no cordão dunar na praia de Mira

Em 2011, foi feita uma intervenção no Bairro Norte da praia de Mira com o objectivo de travar o avanço do mar. Os trabalhos de requalificação e reforço de um cordão dunar consistiram na colocação de cerca de 4500 sacos de areia no local. formado por cerca de 30 mil metros cúbicos de areia ensacada, coberta, posteriormente, por areia, terá quatro metros de altura e uma extensão de cerca de 500 metros

Figura 2.17. – Intervenção na praia de Mira

2.3.3. NOTA FINAL

Pode ver-se que em Portugal já existem vários exemplos de aplicação de geossistemas e geossintéticos em Engenharia Costeira o que refelcte a ideia de que este sector se encontra em desenvolvimento contínuo. As característias dos materiais utilizados (flexibilidade, capacidade de adaptação, de instalação fácil, baixo custo) colocam soluções deste tipo á frente de outras alternativas, ainda que requeiram alguma manutenção e intervenções fortuitas ao longo da sua vida útil no caso de ocorrência de fenómenos de, por exemplo, rompimento de sacos ou perda de areia sobreposta sobre os mesmos.

Exemplos como os que foram apresentados nesta parte final do capítulo evidenciam a aceitação que soluções que usam este tipo de tecnologia têm vindo a ter em Portugal, especificamente, estando já pensadas outras intervenções desta tipolgia para Moledo do Minho e para a restinga de Ofir, objecto de estudo nesta dissertação.

3

3. Caso de Estudo – Restinga de Ofir

3.1. INTRODUÇÃO

A cidade de Esposende situa-se a sensivelmente 50 km a norte do Porto, na zona litoral e faz parte distrito de Braga.

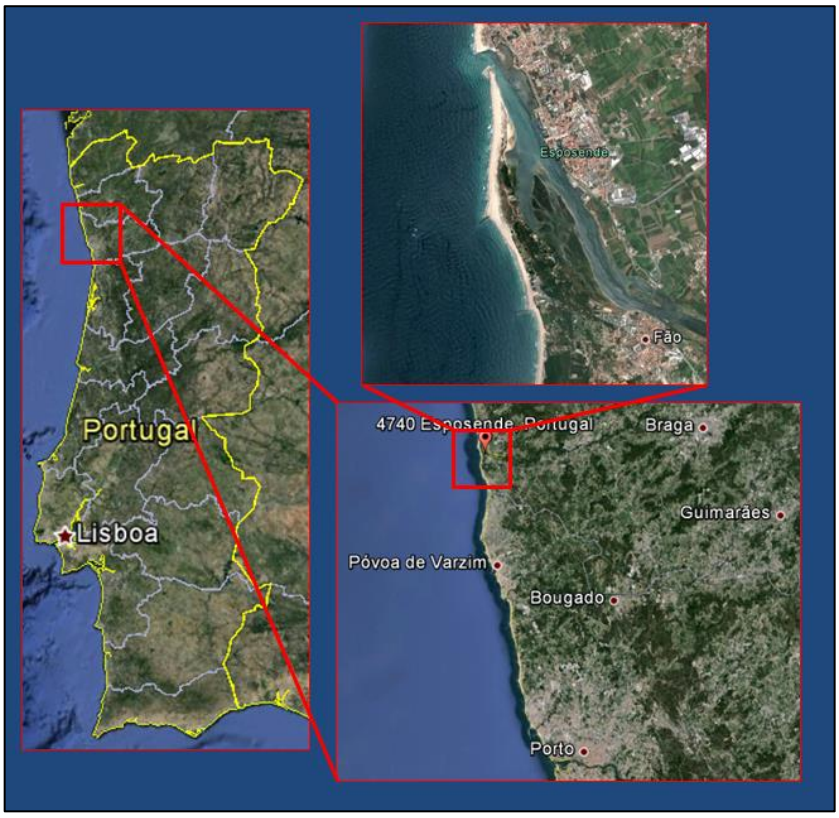


Figura 3.1. - Localização da zona de intervenção (Fonte: Google Earth)

A restinga de Ofir está localizada a sul da foz do rio Cávado, tem 2100 m de comprimento e uma largura variável. As suas praias arenosas são limitadas por arribas talhadas na duna frontal. Atrás da restinga fica situada a cidade de Esposende, pelo que esta funciona como uma protecção natural ao avanço do mar. Em condições de tempestade, especialmente quando associadas a marés vivas, o mar galga a restinga, podendo mesmo provocar uma rotura nas suas áreas mais frágeis, ou destruir-lhe a extremidade Norte. Esta situação, aliada aos fenómenos de erosão que se têm vindo a agravar nos

últimos anos, alerta para o facto de ser imperativo proceder a intervenções que protejam a orla costeira e é neste sentido que se insere esta dissertação.

A região, incluindo as diversas praias e dunas, está abrangida pelo programa "Polis Litoral Norte - Operação Integrada de Requalificação e Valorização do Litoral Norte". Na sequência do relatório do grupo de trabalho Veloso Gomes *et al* (2011), a Polis Litoral Norte, adjudicada à empresa WW (2012), motivou a execução de um projeto de reforço da restinga, com recurso a areia removida da barra e do canal de navegação do rio Cávado, e com cilindros de geossintéticos dispostos ao longo da frente marítima. Ao longo deste capítulo, tal proposta de solução será analisada.

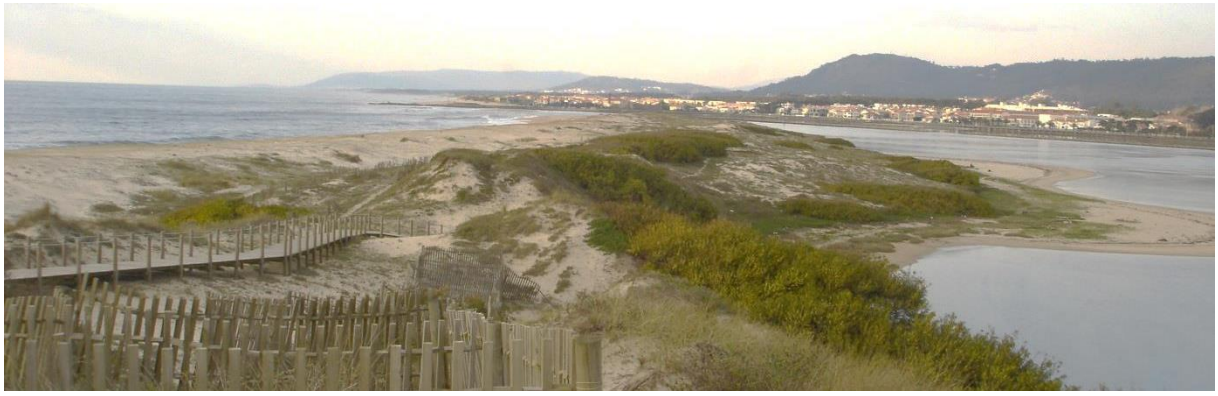


Figura 3.2. - Vista panorâmica da restinga de Ofir

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE INTERVENÇÃO

Este sector costeiro tem vindo a demonstrar ao longo dos anos um equilíbrio instável e uma evolução muito rápida, caracterizada principalmente pela migração de praias para o interior e galgamentos marinhos, que constituem uma ameaça constante para as populações.

Admite-se que as fontes aluvionares de alimentação situadas na plataforma continental têm vindo a esgotar as suas reservas devido à extracção de areias para a construção. A acrescentar a este factor está também o efeito de retenção das areias pelas barragens. Deste modo, são os maciços dunares existentes ao longo deste troço de costa que alimentam as praias adjacentes, acelerando o seu processo de degradação. Ao longo deste processo, a vulnerabilidade das frentes marítimas edificadas suscitou a construção de estruturas de defesa costeira (esporões e defesas frontais de protecção de edificações) com o objectivo de travar a erosão da costa. Contudo, estas obras apenas transferiram os efeitos para as praias adjacentes.

As praias marítimas da restinga são intersectadas por um esporão curvo com 250 m de comprimento, localizado na sua parte intermédia. Embora muito expostas à acção da ondulação de NW, os afloramentos rochosos denominados por Cavalos de Fão e outros provocam refracção e difracção das ondas, contribuindo para uma diminuição da sua energia na chegada à praia, principalmente durante os temporais de SW. Mesmo assim, durante a última década, a orla costeira teve uma taxa de recuo superior a 3 metros por ano. Além das mudanças morfológicas periódicas, as praias mostram uma crescente erosão localizada. Considerando a exposição aos perigos naturais, mais especificamente à erosão costeira e aos galgamentos do mar, toda esta zona costeira apresenta um grau de risco elevado.

Nas praias arenosas a sul da foz do Cávado registaram-se os valores mais elevados do défice sedimentar. As perdas foram mais acentuadas na praia de Ofir (-163 m^3/m/ano entre 2002 e 2004) e na extremidade norte da restinga (-135 m^3/m/ano entre 2001 e 2004). Quanto ao défice registado na extremidade da restinga está, possivelmente, relacionado com a existência da inversão da deriva

sedimentar de sul para norte ao largo deste sector que, conjuntamente com as correntes de maré enchente, transportam os sedimentos para a foz e interior do estuário (Loureiro, 2006)

Outra das problemáticas existentes nesta zona do litoral norte é a alteração das condições de navegabilidade da foz do rio Cávado. Orientada EW, entre um quebramar e a extremidade da restinga de Ofir, tem 40 m de largura e é pouco profunda, apresentando o canal principal uma profundidade variável entre 1 e 3 m na sua parte navegável. Esta zona, apresenta um assoreamento acentuado, característico das desembocaduras destes corpos costeiros como resposta à progressiva subida do nível do mar (Loureiro, 2006).

Conclui-se que as praias da zona costeira de Esposende apresentam um desequilíbrio morfodinâmico, mais acentuado nas praias arenosas, principalmente na restinga, onde se registaram os valores mais elevados do índice de vulnerabilidade e constitui uma área de risco elevado em relação aos galgamentos. A forte erosão (da face oceânica e da extremidade norte) que tem sofrido nos últimos anos tem contribuído para aumentar a sua vulnerabilidade, o que se traduziu em duas rupturas, que motivaram intervenção com reposição das areias durante o período de 2001 a 2005.

3.3. EVOLUÇÃO RECENTE DA RESTINGA E INTERVENÇÕES EFECTUADAS

A erosão da restinga, o galgamento da duna frontal pela acção das ondas durante o inverno e as cheias fluviais aumentaram a intensidade da corrente de vazante, contribuindo para a ruptura da restinga. Após o enchimento artificial (2001/2002) da extremidade da restinga com areia dragada do estuário, durante o inverno de 2005/2006 as condições de forte agitação marítima associados a uma tempestade com direcção de WSW provocaram nova ruptura na zona norte da restinga. Esta ocorrência correspondeu ao culminar de um processo erosivo gradual que a restinga vinha a apresentar desde 2003. A difracção das ondas ao contornarem a extremidade da restinga propaga-se rapidamente para sul, erodindo a face fluvial da restinga. Esta acção erosiva das ondas durante a enchente é potenciada pela intensa reflexão das ondas incidentes no molhe de protecção do Cávado, paralelo à restinga. A acção conjunta das correntes de maré e da ondulação verificada durante o ciclo de maré, aumenta a erosão da face fluvial da restinga, enquanto a face oceânica, com declive bastante reduzido, torna-a mais vulnerável aos galgamentos oceânicos, principalmente em situações de forte agitação marítima coincidentes com marés vivas e/ou cheias, como aconteceu durante os invernos de 2001/2002 e 2005/2006, respectivamente. Actualmente, a extremidade Norte da restinga de Ofir apresenta cotas bastante baixas. Desde a última alimentação artificial (2006), já se perdeu quase todo o material da alimentação na extremidade norte da restinga, conduzindo a que a barreira para a entrada da agitação marítima na marginal de Esposende e no estuário do Cávado esteja em perigo eminente de ruptura (Loureiro, 2006).

Mais recentemente, no âmbito das actividades do Grupo de Trabalho, Veloso Gomes *et al*, 2011, o IPTM (Outubro 2010) identificou os seguintes problemas:

- As repercussões a curto prazo devido á actual instabilidade da barra.: imprescindibilidade de dragagem urgente (e imersão) dos materiais dragados para reposição de cotas de segurança nas docas de pesca e recreio.
- A instabilidade da barra como um problema crónico.: necessidade de encontrar alternativa às dragagens de manutenção como a única forma de melhorar a navegabilidade do rio Cávado e Barra.

- Instabilidade da Restinga, com potencial perda de territórios, risco para pessoas e bens, perda de valores naturais de reconhecida importância nacional e comunitária (PNLN, SIC PTCON 0017 Litoral Norte).
- Assoreamento da barra, dificultando a circulação de embarcações de pesca e outras.
- Ocupação urvana e presença de outras formas de uso e ocupação em área vulnerável a erosão, galgamento e inundação (num cenário de subida do nível médio das águas do mar e de maior probabilidade de ocorrênciade situações climatéricas extremas).

A sequência das imagens da figura 3.3. ilustra a evolução da restinga ao longo das últimas décadas. É perceptível o emagrecimento do corpo da restinga, a perda de sedimentos principalmente na sua extremidade, bem como a sua migração para Este e consequente estreitamento do canal.

Figura 3.3. - Evolução do corpo da restinga (Fontes: INAG e Google Earth)

O quadro 3.1. sintetiza a informação acerca das intervenções efectuadas na restinga desde 1994.

Quadro 3.1.- Intervenções efectuadas na Restinga de Ofir (Fonte: WW, 2012)

Ano	Intervenção	Custo (sem IVA)	Observações
1994	105 000 m^3	344 456 €	Empreitada motivada pelo rompimento da restinga no Inverno de 1993. Cota da restinga aumentada para +9 m ZH
1998	300 ha	14 915 €	Colocação da Restinga à cota +10,5 m ZH
2001	15 000 m^3	116 427 €	-
2006	112 000 m^3	660 000 €	Reforço da extremidade da restinga em 225 m +6,0 m (ZH). Reforço da margem direita da restinga ao longo de 200 m

Da análise do quadro pode concluir-se que o intervalo de tempo entre intervenções é inferior a 5 anos e que foi gasto, em média, 70 000 € por ano na manutenção da restinga. Este facto reforça a ideia de que é necessário proceder a uma intervenção mais fiável e duradoura no sentido de evitar o gasto de dinheiros públicos em soluções de recurso.

3.4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A proposta do grupo de trabalho Veloso Gomes *et al* (2011), projectada pela WW, não passa apenas pelo combate directo à erosão, mas sim por todo um programa de intervenção que visa valorizar e requalificar o cordão dunar que ao longo dos últimos anos se tem vindo a degradar. Esse programa divide-se em 4 tipo de acções:

- Intervenções de defesa activa do litoral decorrentes de medidas correctivas de erosão de superfície: estabilização de arribas, alimentação artificial de praias, reforço de cotas de zonas baixas ameaçadas pelas águas, reforço de margens para contenção do avanço das águas em zonas sujeitas a influência das marés. O estado em que a restinga se encontra, com cotas bastante baixas, implica a alimentação artificial do seu corpo na medida em que está constantemente exposto a acção da agitação marítima. Também está previsto a mobilização de 16 000 m^3 de areias para alimentação das praias a sul para combate ao fenómeno erosivo.
- Ações de transposição de sedimentos em barras, de restabelecimento da adução de sedimentos à costa e de optimização do equilíbrio hidrodinâmico. Estão previstos trabalhos de remoção de areias da zona do estuário do Cávado, cuja navegabilidade tem vindo a ser ameaçada. O destino da areia dragada será o corpo da restinga.
- Protecção e recuperação de sistemas dunares: a intervenção em causa consiste essencialmente na recuperação de um sistema dunar, a extremidade norte da restinga de Ofir, e na protecção do restante corpo da restinga, na medida em que o processo erosivo ir-se-á propagar para sul, caso não seja efectuada nenhuma intervenção de consolidação da restinga.

- Ações de reposição das condições de ambiente natural que assegurem a sua estabilidade biofísica por via da recuperação, consolidação e protecção dos sistemas costeiros, contenção da ocupação ou da densificação da ocupação em zonas vulneráveis. Essas acções incidem sobre a colocação de passadiços sobreelevados e módulos de parqueamento de bicicletas de forma a minimizar o pisoteio das dunas, receptáculos de resíduos sólidos urbanos que devido ao facto de actualmente serem escassos facilitam a deposição indiscriminada de lixo, substituição de paliçadas que se encontram em muito mau estado, colocação de painéis informativos com o objectivo de sensibilizar a população para a intervenção e especialmente para a função dos geossintéticos que, sendo uma técnica inovadora, poderá suscitar a curiosidade das pessoas e/ou actos de vandalismo. Esta acção compreende ainda a revegetação do corpo da restinga com a espécie *Amophilla arenaria*, com características de retenção de areias.

Tendo sido definidos as principais acções que a intervenção exigia, o projecto desenvolveu-se baseado essencialmente em 2 requisitos, compatibilizar o volume de areia necessário à reconstituição da restinga com o volume de areia dragada e ainda garantir uma largura de coroamento que minimizasse o galgamento da restinga. Foram, então, estudadas duas soluções para a duna artificial de reforço da restinga

- Solução 1, com o coroamento da duna à cota + 10 m ZH e com uma largura de coroamento de 40 m.
- Solução 2, com o coroamento da duna à cota + 8 m ZH e com uma largura de coroamento de 50 m.

A Polis Litoral Norte decidiu optar pela Solução 2 por ter menor impacte visual e também pelo facto desta solução apresentar uma cota de coroamento próxima da do último reforço em 2006.

O volume total de areia necessário é de 158 730 m^3, repartido da seguinte forma: 99 495 m^3, para a construção da duna artificial, 36 335 m^3 para o enchimento dos geocilindros de protecção da duna artificial, 6 900 m^3 para cobrir os geocilindros do lado do rio com areia e 16 000 m^3 para o reforço do talude do lado do mar das praias a sul da intervenção. Como já referido, a areia a utilizar no reforço da restinga é proveniente da zona terminal do rio Cávado, nomeadamente da zona terminal do canal de navegação e da barra. A remoção de sedimentos da zona de empréstimo será efectuada até à cota -1 m ZH na zona terminal do canal de navegação e até à cota – 3 m ZH na zona da barra. Serão removidos 64 275 m^3 da barra e 94 455 m^3 do canal de navegação (WW, 2012).

Os geocilindros deverão ser feitos de polipropileno ou poliéster e ser do tipo tecido. O material terá também que ser resistente à degradação por U.V. e à degradação química, uma vez que os cilindros estarão expostos.

3.5. NOTA FINAL

Os aspectos relativos ao dimensionamento dos cilindros de geossintéticos, bem como à morfologia do protótipo, serão retratados em capítulos posteriores, capítulo 4 e 5 respectivamente.

A presente intervenção é uma acção piloto no que toca à utilização de geocilindros numa grande estrutura costeira como substituição de técnicas mais pesadas de engenharia. Os resultados obtidos na intervenção em projecto serão essenciais para a análise da exequibilidade da aplicação deste tipo de sistemas em Portugal e em outros locais do mundo com climas de agitação bastante energéticos.

Sendo a solução desenvolvida pela WW o alvo desta dissertação, foi testado o seu comportamento. No capítulo 5 está descrito todo o processo. Porém, como os ensaios decorreram num tanque de ondas, a zona fluvial foi impossível de reproduzir e por isso os acontecimentos ocorridos a sotamar da estrutura são diferentes em relação à realidade.

4

4. Aspectos do Dimensionamento

4.1. DIMENSIONAMENTO DOS GEOCILINDROS – ASPECTOS GERAIS

As formulações existentes e que foram consideradas para este projecto foram as indicadas pela proposta da WW (2012), nomeadamente as de van Steeg e Vastenburg (2010), as de Wouters (1998), a de Oumeraci *et al*. (2002) e a de Antunes do Carmo *et al*. (2009).

Os primeiros estudaram a estabilidade de cilindros de geotêxtil e a possível migração de areias dentro dos tubos quando estes estão sujeitos a agitação. Foi utilizada uma vasta gama de cilindros, com dimensões e percentagens de enchimento diferentes. Foram experimentadas várias configurações, desde a colocação de um cilindro simples até à configuração piramidal.

As principais conclusões dos testes em questão foram:

- Em todos os ensaios foi verificado o deslize dos cilindros;
- Todos os tubos dispostos de maneira isolada deslizaram no sentido do mar para a terra;
- A colocação de dois tubos lado a lado não aumentou significativamente a estabilidade da estrutura. O tubo do lado da terra começa a deslocar-se devido à pressão hidrostática causada pela água aprisionada entre os dois tubos;
- A colocação de 3 cilindros na forma piramidal gerou um mecanismo de rotura chamado círculo de deslizamento (*slip circle*). Para evitar este fenómeno utilizou-se uma barra fixa do lado de terra, que calçou a estrutura, simulando uma trincheira, e evitou que este mecanismo se desenvolvesse para esse lado. Para o lado exposto verificou-se o desenrolar desse mecanismo, uma vez que não foi colocada a barra;
- A migração de areia no interior do tubo foi constatada, embora não tivesse sido considerado que este aspecto pudesse provocar falhas;
- Os parâmetros que revelaram requerer mais atenção foram: percentagem de enchimento dos cilindros; a sua forma bem como as características (especificamente a deformabilidade e a espessura) do geotêxtil; o coeficiente de atrito entre os cilindros e o material de fundação;
- A deformação dos tubos é função da percentagem de enchimento dos mesmos. Quando este parâmetro tem um valor mais alto, verifica-se menor deformação. Para além disso, esta percentagem têm influência na altura útil da estrutura.

Baseando-se nos ensaios efectuados, van Steeg e Vastenburg deduziram a seguinte expressão (4.1.):

$$\frac{\chi \,.H_S}{\rho' \sqrt{BH}(\phi \cos\beta + \sin\beta)} \leq 0.65 \qquad (4.1.)$$

onde,

$$\rho' = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} \qquad (4.2.)$$

Sendo ρ a massa volúmica da areia, ρ_w a massa volúmica da água, Hs a altura de onda significativa, B e H são a largura e altura do cilindro, respectivamente, ϕ é o coeficiente de atrito e β o ângulo de colocação da estrutura como indica a figura 4.1.. O coeficiente χ é um factor de correcção associado ao galgamento.

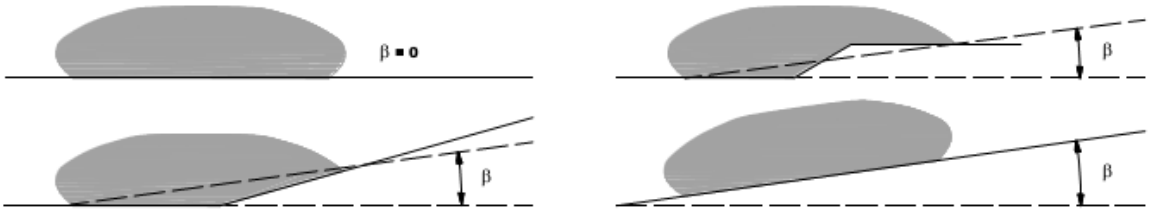


Figura 4.1.- Determinação do parâmetro β (Fonte: Das Neves (2011))

Por sua vez, a formulação de Wouters é dada por:

$$\frac{H_s}{\rho' D_n} = \frac{2{,}0}{\sqrt{\xi}} \qquad (4.3.)$$

onde H_s é a altura de onda significativa, ρ' é definido por (4.2.) , D_n é o diâmetro nominal do cilindro e ξ é um factor associado à rebentação da onda (número de Irribarren) dado por (4.4.).

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_{op}}}} \qquad (4.4.)$$

onde α é o declive da estrutura e L_{op} o comprimento da onda em águas profundas.

A formulação de Oumerci *et al* (Eq. (4.5.)) e de Antunes do Carmo *et al*. ((Eq. (4.6.)) têm como base a de Wouters.

$$\frac{H_s}{\rho' D_n} = \frac{2{,}75}{\sqrt{\xi}} \qquad (4.5.)$$

$$\frac{H_s}{\rho' D_n} = \frac{2{,}5}{\sqrt{\xi}} \qquad (4.6.)$$

4.2. DIMENSIONAMENTO DOS GEOCILINDROS – RESTINGA DE OFIR

Nos cálculos efectuados foram consideradas ondas com as seguintes características:

- altura significativa ao largo de 8,5 m e de 9,5 m;
- período de pico de 12 e 14 s;
- nível de maré de 4,34 m.

Quando aplicada a fórmula de Van Steeg e Vastenburg (2010), verificou-se que dois dos parâmetros, nomeadamente o coeficiente de atrito, ϕ, e o coeficiente de correcção χ, terão um papel muito importante em questões de estabilidade/instabilidade hidráulica. Para analisar a influência destes dois coeficientes, foi feita uma análise de sensibilidade. Fez-se o cálculo do diâmetro mínimo utilizando valores diferentes para χ e ϕ (quadro 4.1.)

Quadro 4.1. - Condições de análise testadas por Van Steeg e Vastenburg (2010)

	χ	ϕ
1	1	[0,55;0,85]
2	0,9	[0,55;0,85]
3	0,8	[0,55;0,85]

Com base nos resultados obtidos, e tendo sido verificada uma grande variabilidade de resultados, optou-se pelo conjunto de valores, por segurança: (ϕ ; χ) = (0,65; 0,9).

Os resultados obtidos para todas as formulações descritas apresentam-se no quadro 4.2. ..

Quadro 4.2. - Diâmetros mínimos calculados (Fonte: PLNL)

H_s	T_p(s)	L_0(m)	H_s(m)	ξ	Diâmetro mínimo dos cilindros			
					Wouters (1998)	Oumeraci *et al* (2003)	Antunes do Carmo *et al* (2009)	Van Steeg e Vastenburg (2010)
8,5	10	225	3,7	3,1	5,7	4,1	2,4	4,6
	12	306	3,8	3,6	6,3	4,6	2,6	4,7
9,5	10	225	3,8	3,1	5,8	4,2	2,4	4,7
	12	306	3,9	3,5	6,4	4,6	2,7	4,8

Com base nos resultados obtidos, a WW (2012) propõe a utlização de cilindros com diâmetro de 5,0 m.

5

5. Trabalho Experimental

5.1. ENQUADRAMENTO

Neste capítulo estão descritos todos os passos tomados na realização dos ensaios em modelo físico, bem como explicações acerca das decisões tomadas no decorrer do processo, desde a análise da proposta fornecida até à interpretação dos resultados.

Os trabalhos basearam-se no projecto fornecido pela empresa *WW Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.,* e tinham como objectivo observar o comportamento da estrutura proposta.

É importante referir que a situação real em estudo compreende uma zona marítima e uma zona fluvial. Perante a impossibilidade de reproduzir a zona fluvial no tanque de ondas, a agitação a sotamar da estrutura será bastante diferente, pelo que os esforços foram direccionados principalmente para a adequada modelação do lado exposto da restinga, não havendo tanta preocupação com o lado abrigado da mesma.

Outros ensaios deste tipo, com instrumentação e metodologia análogos aos utilizados podem ser encontrados em Rosa Santos (2010), Silva (2010), Alves (2011) e Sousa (2012).

5.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

5.2.1. TANQUE DE ONDAS

O tanque de ondas, situado no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e altura de 1,2 m. Num dos topos do tanque estão localizados os batedores, responsáveis pela geração da agitação, e no topo contrário foi construída uma praia dissipadora, cuja principal função é a dissipação da energia das ondas geradas, evitando reflexões que prejudiquem o normal decorrer dos ensaios.

5.2.2. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ONDAS

O sistema de geração de ondas é constituído por 16 batedores do tipo pistão, com 0,75 m de largura cada, accionados por motores eléctricos. As pás batedoras têm os seus movimentos independentes entre si, o que permite uma elevada flexibilidade no seu funcionamento: geração de ondas com apenas uma direcção ou com várias direcções, funcionamento em serpente ou utilizando apenas determinados batedores. O sistema pode funcionar para profundidades até cerca de 1 m e gerar ondas com frequências e alturas variáveis em função da profundidade da água, da capacidade de geração dos

batedores e do limite físico de rebentação. Outra das funcionalidades deste sistema é permitir a compensação das ondas reflectidas pelo modelo físico e pela praia dissipadora através do movimento das pás. Todo este sistema é controlado pelo software HR WaveMaker, sendo a sua utilização bastante simples. Existe a possibilidade de geração de vários climas de agitação desde regular e irregular, à alteração da orientação das ondas criadas ou à criação de ondas bidireccionais.

5.2.3. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE NÍVEIS HIDRODINÂMICOS

Para a medição da altura de onda são usadas sondas de níveis hidrodinâmicos. Neste estudo foram utilizadas sondas de 600 milímetros. No âmbito desta tese, apenas foram utilizadas sondas para verificar se as condições de agitação pretendidas estariam a ser efectivamente reproduzidas pelo sistema. No entanto, poderiam ser utilizadas mais e com posicionamentos diferentes, caso fosse necessário analisar outras características, nomeadamente, reflexões ou empolamento.

A comunicação das sondas com o sistema de aquisição de dados ocorre através de um módulo de monitorização e do *software* HR Wave Data. O seu funcionamento consiste na medição de corrente que atravessa um par de fios em aço inoxidável, os quais compõem as sondas. Estes funcionam como um condensador e a sua diferença de potencial é proporcional à profundidade de imersão. Para além do processamento de dados, o *software* possui uma rotina para calibração das sondas, que consiste na obtenção de uma recta por ajuste linear e que relaciona os valores da profundidade de imersão das sondas com as medições das respectivas voltagens. A calibração das sondas é um processo minucioso e moroso que deve ser efectuado antes do início da série de ensaios, quando não existir qualquer agitação no tanque.

5.2.4. CILINDROS DE GEOSSINTÉTICOS

Antes do início do trabalho experimental já existiam cilindros geossintéticos no LH, utilizados em estudos anteriores. Existiam 20 geocilindros, todos com o mesmo comprimento e diâmetro, 2,10 m e 0,15 m respectivamente e foi a partir destes que se começou a projectar o modelo. Porém, as características do modelo exigiam o uso de 4 cilindros com o mesmo diâmetro mas com 1,60 m de comprimento pelo que se procedeu ao corte dos cilindros existentes. Para colmatar esta perda, optou-se por encher 2 cilindros de 0,16 m de diâmetro e 2,75 m de comprimento. Todos os cilindros foram cedidos pela GEOSIN®.

É de salientar que os cilindros possuem um determinado diâmetro teórico mas quando aplicados em obra, devido ao facto do enchimento não ser feito na sua totalidade e também à contribuição das forças gravíticas, apresentam uma configuração diferente, apresentada na figura 5.1.

Figura 5.1. - Dimensões dos cilindros utilizados (Fonte: Alves (2011))

O enchimento, tanto dos cilindros antigos, como dos novos, foi feito com a areia existente no LH, apoiando-os no fosso lateral e com a ajuda de um funil (Figura 5.2.).

Figura 5.2. – Enchimento dos geocilindros

5.3. METODOLOGIA

5.3.1. CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS NO PROTÓTIPO

O clima de agitação que se faz sentir na costa portuguesa é muito energético. No âmbito deste trabalho fez sentido observar o comportamento do modelo tanto para valores de agitação considerados médios, como para valores altos associados a situações de temporal. Coelho, 2005, apresenta uma análise da distribuição das alturas, períodos e também rumos dominantes registados pela bóia ondógrafo instalada ao largo do Porto de Leixões, no período entre os anos de 1993 e 2003.

Relativamente à altura de onda significativa verifica-se que a maior percentagem de ocorrências é da classe entre 0,5 e 1,5 m, com 40 %, seguida do escalão 1,5 a 2,5 m, com 31,7 %, e do escalão 2,5 a 3,5 m, com 13,3 %. Observa-se também que só por 18 vezes se ultrapassa a altura de 8,5 m, o que corresponde a 0,7 %.

Em relação ao período significativo, o escalão mais frequente é o compreendido entre 8 e 10 s, com 30 %, a que se seguem os escalões, 6 a 8 s e 10 a 12 s, com cerca de 25 % cada. A percentagem de registos inferiores a 6 s é de 5,9% do total de registos, enquanto a percentagem dos registos superiores a 13 s é de 7,6 %. Relativamente à distribuição conjunta altura significativa/período significativo, os escalões mais frequentes são 0,5 a 1,5 m e 6 a 9 s, com 24 % dos registos, 1,5 a 2,5 m e 8 a 11 s, com 17 %, e 2,5 a 3,5 m, e 9 a 12 s.

No que respeita às direcções de onda, cuja distribuição é apresentada na figura 5.3., verifica-se que o quadrante de Noroeste é aquele com predominância de origem da ondulação, com 42,4 %. Todas as ondas com proveniência do quadrante de Sudoeste representam apenas 3,9 % do total de registos. A classe de direcção de ondulação de Oeste correspondeu a 7,7 % dos registos. O rumo de WNW assume maior relevo em temporal, bem como o rumo de NW. Nas situações de maior altura de onda,

os quadrantes de NW e WNW representam com igual importância 91 % do total de registos. (Coelho, 2005)

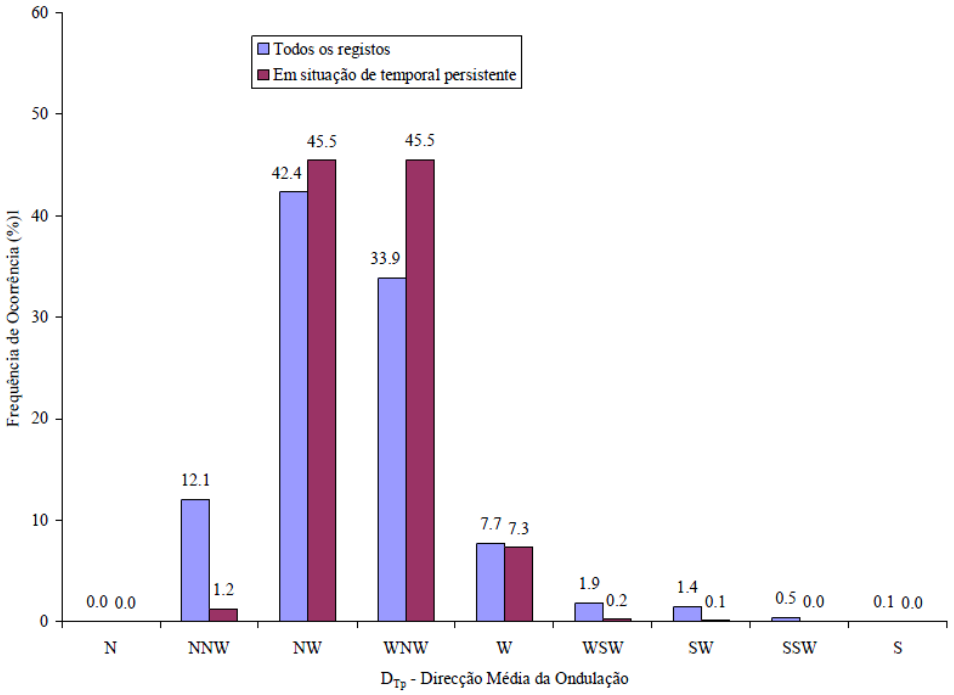


Figura 5.3. - Comparação da direcção média anual com situações de temporal (dados do IH para o período 1993-2003, para a bóia ondógrafo do porto de Leixões) (Fonte: WW, 2012)

Para a caracterização do nível de maré na zona em estudo foi consultada a tabela de marés, fornecida pelo Instituto Hidrográfico, relativo ao porto de Viana do Castelo. Dessa tabela o valor mais relevante para este caso é o de Preia-Mar de Águas Vivas, +3,49 m (ZH), visto que o objectivo é representar a situação que apresente as condições hidrodinâmicas mais desfavoráveis. Note-se que os valores indicados nas tabelas poderão ser diferentes dos valores reais em consequência da variação do nível médio do mar, principalmente devido à acção das condições atmosféricas. Estas diferenças não ultrapassam, geralmente 0,3 a 0,4 m mas poderão em situações excepcionais, atingir valores sensivelmente mais altos.

Quadro 5.1. - Síntese das características hidrodinâmicas no protótipo (Fonte: Adaptado de Coelho,2005)

Altura de onda significativa média (m)	0,5-3,5
Período de pico médio (s)	6-12
Nível médio da água do mar (m)	2 m (ZH)
Nível Preia Mar de Águas Vivas (m)	+3,49m (ZH)

5.3.2. CARACTERIZAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

- O projecto da WW (2012) consultado impõe as seguintes características:
- Cota de coroamento + 8 m ZH;
- Talude do lado do mar com declive de 1V: 2H, e do lado do rio com 1V: 2H e 1V: 1,5H;

- A implantação do reforço é efectuada de forma a ligar o corpo actual da restinga ao banco de areia que se situa a norte do mesmo, de forma a provocar um aumento de velocidades na zona terminal do rio Cávado, contribuindo desta forma para um menor assoreamento nesta zona;
- Largura de coroamento mínima de 50 m;
- De forma a conter as areias utilizadas no reforço por um período de tempo maior, e conforme requerido pelo Caderno de Encargos, previu-se a colocação de geocilindros com um diâmetro de 5 m na base do reforço, da seguinte forma:
    - No talude do lado do mar – colocação de três fiadas de geocilindros até à cota + 9,1 m ZH, sendo as fiadas desencontradas em planta;
    - No talude do lado do rio - colocação de duas fiadas de geocilindros até à cota + 6,4 m ZH;
    - Os geocilindros da fiada inferior contém uma protecção de pé de talude do lado do mar/rio constituída por uma tela de geotêxtil, que liga o geocilindro da fiada inferior a um geocilindro com 5 m de diâmetro;
    - Os geocilindros colocados do lado do rio Cávado serão cobertos com areia, de modo a não introduzir elementos artificiais na paisagem da marginal de Esposende. No enraizamento do reforço será adoptada uma cota de coroamento de + 9,5 m ZH.

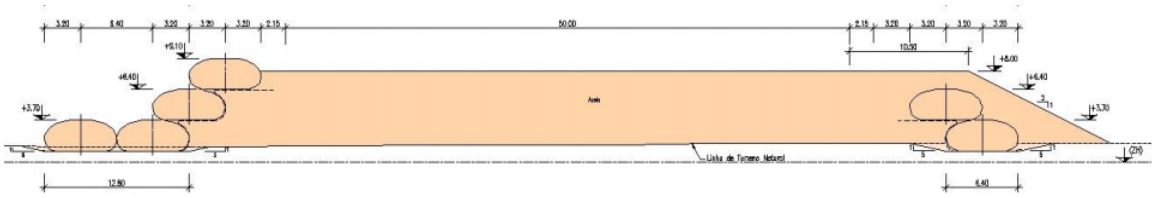


Figura 5.4. – Perfil-tipo da restinga (Fonte: WW, 2012)

5.3.3. CONCEITO DE SEMELHANÇAGrande parte do progresso em Hidráulica e Mecânica dos Fluidos é consequência da experimentação, particularmente em modelos reduzidos. Segundo Quintela, 2011, dois sistemas dizem-se fisicamente semelhantes relativamente a um conjunto de grandezas quando há uma relação constante entre vários valores homólogos dessas grandezas nos dois sistemas.

A semelhança geométrica é a semelhança de formas e traduz-se pela existência de uma relação constante entre comprimentos homólogos nos dois sistemas.

A semelhança cinemática é a semelhança do movimento e consiste em partículas homólogas descreverem percursos homólogos em tempos proporcionais.

A semelhança dinâmica existe se as relações entre as componentes vectoriais de todas as forças dos dois sistemas forem constantes (Taveira Pinto, 2012).

Porém, a semelhança dinâmica perfeita é impossível de obter sendo, por isso, necessário, seleccionar as forças dominantes em detrimento das restantes forças, que não terão tanto significado para o estudo.

Na situação de modelação costeira e especificamente no estudo da interacção das ondas com determinadas estruturas, o critério de semelhança mais indicado será o de *Froude,* uma vez que a gravidade no modelo e no protótipo é a mesma e são as forças gravíticas o factor determinante no movimento do fluído, sendo as escalas dos modelos estabelecida de acordo com a lei homónima.

$$Fr = \frac{U^2}{g.L} \qquad (5.1.)$$

onde U é a velocidade, g a aceleração da gravidade e L o comprimento.

A igualdade de *Froude* permite determinar a escala de tempos, velocidades e outras grandezas em função da escala de comprimentos. No contexto da tese, apenas será relevante indicar a escala de tempos (Eq. 5.2.) associada a este critério de semelhança.

$$\lambda \mathrm{t} = \lambda \mathrm{l}^{1/2} \qquad (5.2.)$$

5.3.4. MORFOLOGIA DO MODELO

Tendo como base o perfil tipo da restinga, trapezoidal, fornecido pela WW (2012) procurou-se a modelação física de uma restinga que respeitasse essa mesma forma tendo em conta uma escala adequada para implantação no tanque.

À partida, os materiais que iriam ser utilizados no modelo seriam areia e os 20 cilindros de geossintéticos, com um diâmetro de 15 cm, disponíveis no LH. Estes cilindros têm um comprimento de 2,10 m.

Para a definição da escala, comparou-se o diâmetro teórico dos cilindros previstos para a obra à escala real, 5 m, com o diâmetro dos cilindros já existentes, 15 cm. A partir desta relação, fixou-se a escala geométrica em 1/33 e foi possível calcular a escala de tempos, indicada no quadro 5.2. .

Quadro 5.2. - Escalas utilizadas no modelo

Escala	Valor
λl	$1/33$
λt	$1 / \sqrt{33}$

Não havendo possibilidade de alterar a escala, dado que esta foi fixada pelas dimensões dos cilindros existentes, foi necessário analisar a extensão longitudinal do modelo. O projecto em que foram baseados os trabalhos incide sobre uma extensão total do lado exposto de 408,6 m (12,38 m em modelo). Esse comprimento seria impossível de reproduzir em modelo pois as dimensões do tanque de ondas (12 m de largura) não o permitiriam. Assim, optou-se por uma extensão correspondente a 3 comprimentos de cilindro, perfazendo 6,30 m. Deste modo, a restinga estender-se-ia até aproximadamente metade da largura do tanque de ondas, situação que se considerou adequada pois evitaria que a agitação na zona da cabeça fosse influenciada pela parede lateral do tanque de ondas.

No que diz respeito à batimetria dos fundos na zona em estudo, não foram encontrados quaisquer dados, pelo que foram consideradas e desenhadas várias hipóteses, fazendo variar tanto a cota de fundo como a inclinação do talude da parte submersa. Estas hipóteses foram sugeridas pelos orientadores. De entre as várias opções foi eleita aquela que conduziu a um menor volume de materiais. No quadro 5.3. apresentam-se as quantidades calculadas para cada uma delas.

Quadro 5.3. - Volumes de areia (m^3) associados a cada hipótese

Cota de Fundo	Declive		
	1:10	1:15	1:20
-5	7,91	8,54	9,27
-8	11,33	12,68	14,17
-10	13,97	15,95	18,10

Em relação à orientação do modelo, numa fase preliminar pensou-se em dar uma inclinação ao modelo de modo a que a direcção de incidência das ondas fosse mais fiel à realidade. Tal ideia acabou por ser abandonada pois essa situação exigiria a utilização de uma maior quantidade de materiais e também mais tempo para a construção e reconstrução do modelo.

Nas figuras 5.5. e 5.6. podem observar-se as peças desenhadas, associadas ao modelo de fundos móveis construído. Foi incluído na restinga um núcleo de brita com o objectivo de reduzir a quantidade de areia a utilizar.

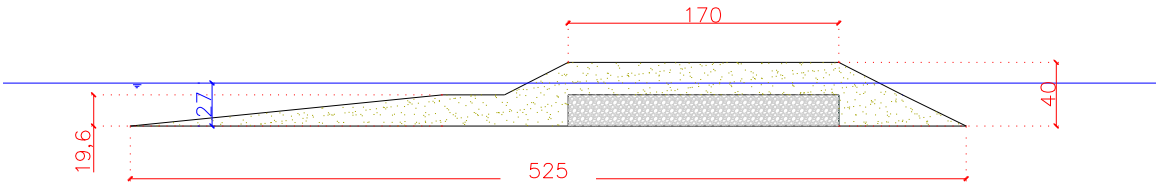


Figura 5.5. - Perfil transversal da restinga construído em modelo (medidas em milímetros)

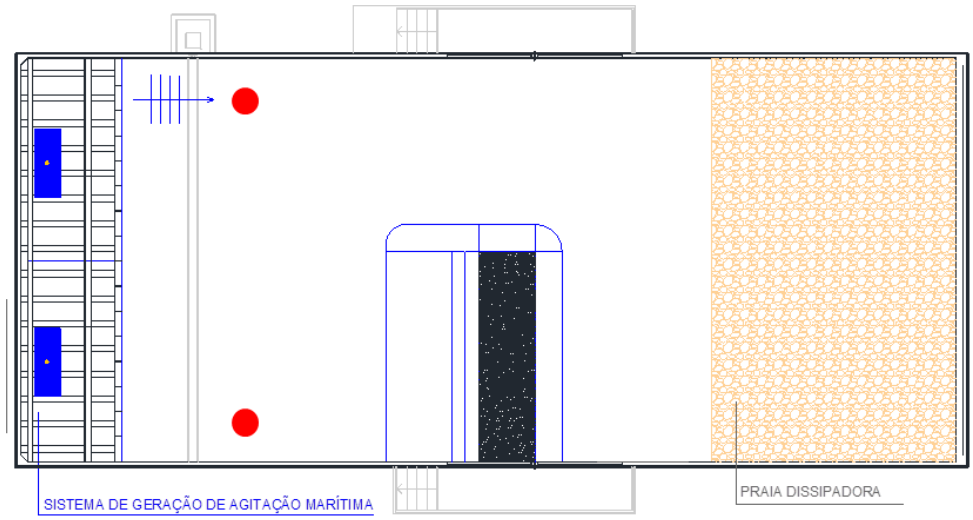


Figura 5.6. - Planta do modelo físico construído no tanque de ondas

A altura de água utilizada foi de 27 cm que corresponde à consideração de fundos á cota de -5,00 m (ZH) e de um nível de água de +4,00 m (ZH)

5.3.5. CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS NO MODELO

De modo a reproduzir no modelo físico condições de agitação o mais idênticas possível às condições reais, optou-se por utilizar a agitação irregular.

No quadro 5.4. apresentam-se as condições de teste escolhidas para o trabalho experimental. A escolha destas condições seguiu uma lógica onde, primeiramente, eram geradas as condições de agitação consideradas médias para a zona de estudo, sendo sucessivamente aumentados, tanto a altura como o período da onda, culminando num clima de agitação considerado típico numa situação de temporal.

Quadro 5.4. - Condições de agitação que viriam a ser reproduzidas no tanque de ondas

Condições de Teste	Protótipo			Modelo		
	Hs (m)	*Tp (s)*	*Θ (°)*	*Hs (cm)*	*Tp (s)*	*Θ (°)*
1	1,5	8	0	4,55	1,39	0
2	2,5	10	0	7,58	1,74	0
3	3,5	12	0	10,61	2,09	0

Um sistema de geração de agitação marítima consegue gerar ondas até uma determinada altura máxima. Esta é definida tendo em conta o limite de rebentação das ondas dentro do tanque bem e o limite de desempenho do gerador. Segundo Beresford, 2007, citado por Sousa, 2012, o critério de rebentação das ondas dentro do tanque é dado pelas seguintes condições:

$$\begin{cases} H \leq \frac{L}{7}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \vee \quad H \leq \frac{L}{10}\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \\ H \leq 0.6\,d \end{cases} \qquad (5.1.)$$

Estas condições são função do período da onda a gerar bem como da profundidade da água no tanque.

Na figura 5.7. estão representados ambos os limites referidos para as profundidades de 20 e 30 cm bem como as condições de teste utilizadas. Nesta pode constatar-se que as condições de agitação marítima geradas respeitam os limites impostos o que significa que as ondas podem efectivamente ser geradas.

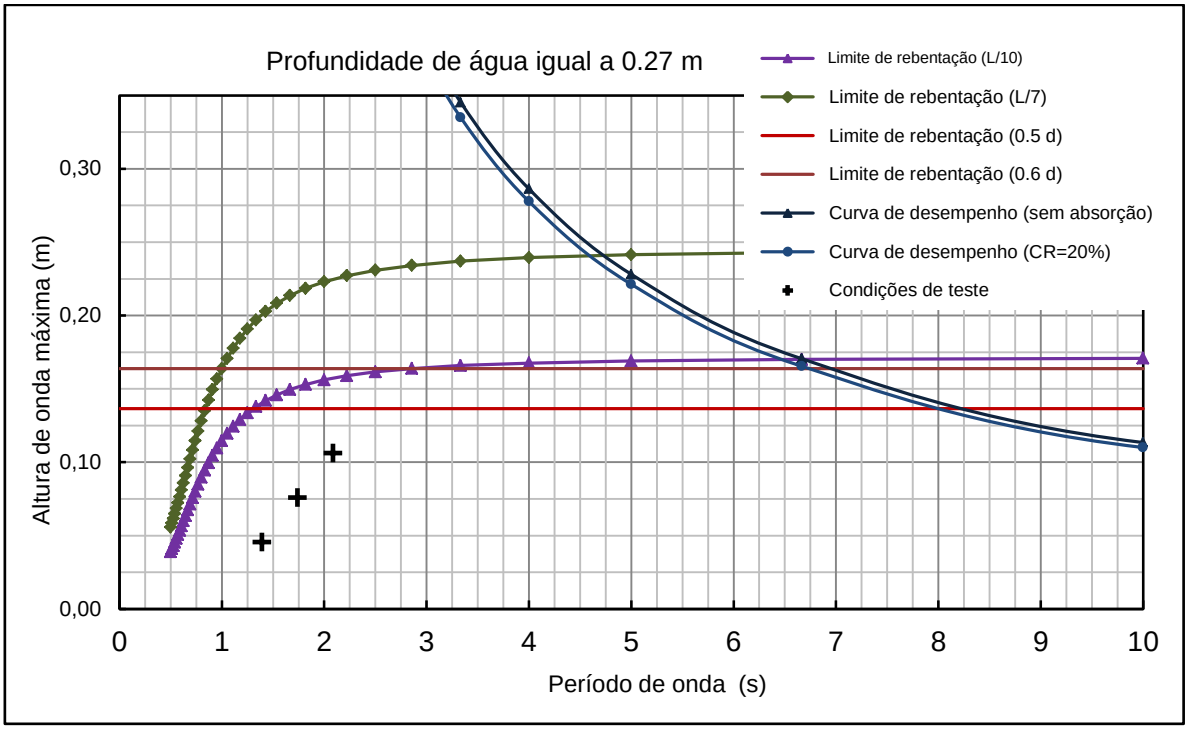


Figura 5.7. - Limites de altura de onda máxima a reproduzir no tanque de ondas do LH-FEUP, em função do período de onda

5.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.4.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO

Tendo sido definidas as principais características do modelo, deu-se início à construção do mesmo. Posicionou-se o modelo numa zona central do tanque de modo a que o talude exposto ficasse alinhado com as janelas laterais para uma melhor observação.

Como referido, o modelo compreendia um núcleo de brita (e não de areia) devido a questões relacionadas com a disponiblidade de materiais. Esse núcleo estava confinado por uma tela de geotêxtil.

Figura.5.8. – Evolução do processo de colocação da brita no núcleo da restinga

Para facilitar a limpeza do tanque, no final dos ensaios, a separação entre os dois materiais utilizados no modelo foi feita usando uma tela de geotêxtil. Este pormenor construtivo pode ser visto na figura 5.9..

Figura 5.9. - Colocação da tela de geotêxtil que estabelece o confinamento do núcleo em brita. A areia foi colocada sobre esta tela.

De seguida, foi colocada a areia respeitando as alturas e as inclinações dos taludes definidos anteriormente.

Figura 5.10. - Aspecto final do modelo de fundos móveis construído do LH

Sobre o modelo de fundos móveis apresentado, foram colocados os cilindros de geotêxtil sendo que no lado exposto (figura 5.11.) foram aplicadas 4 fiadas de Geotubos ϕ0,15 m ao longo de todo o comprimento, na zona da cabeça foram colocadas 4 fiadas do mesmo tipo de cilindros e no lado abrigado (figura 5.12.) apenas foram colocados 4 cilindros com ϕ0,15 m na zona mais próxima da cabeça e os 2 cilindros de ϕ0,16 m no troço adjacente.

Figura 5.11. – Configuração dos cilindros no lado exposto do modelo

Figura 5.12. – Configuração dos cilindros no lado abrigado do modelo

Com a realização dos trabalhos pretendia-se observar o movimento de areias ao longo do tempo, bem como a estabilidade da estrutura proposta.

5.4.2. PROGRAMA DE ENSAIOS

Os ensaios efectuados dividiram-se em 3 séries principais. Dentro de cada série, a altura e o período de onda eram aumentados, sucessivamente, sem haver reconstrução do modelo. Assim, as condições de agitação subsequentes incidiriam sobre um perfil trabalhado resultante dos ensaios anteriores. Com isto pretendia-se simular a situação real em Ofir, onde não há reconstruções durante longos períodos de tempo.A ordem dos ensaios é apresentada no quadro 5.5.

Quadro 5.5. - Resumo dos ensaios realizados em modelo reduzido e das condições de agitação marítima estudadas

Ensaio	Protótipo		Modelo		h (cm)	Duração do ensaio (aprox. em min)
	Hs (m)	*Tp (s)*	*Hs (cm)*	*Tp (s)*		
Série I - Restinga Protegida com Geossintéticos						
I.1	1,35	8	4,55	1,39	27	30
I.2	2,61	10	7,58	1,74	27	30
I.3	3,22	12	10,61	2,09	27	30
Série II - Restinga Protegida com Geossintéticos com reforço nas juntas						
II.1	1,38	8	4,55	1,39	27	30
II.2	2,64	10	8,12	1,74	27	30
II.3	3,56	12	10,61	2,09	27	30
Série III - Restinga Sem Protecção						
III.1	1,36	8	4,55	1,39	27	30
III.2	2,55	10	8,12	1,74	27	30
III.3	3,57	12	10,61	2,09	27	30

Note-se que os valores indicados no último quadro são ligeiramente diferentes dos indicados no quadro 5.4. pois correspondem aos valores medidos pelas sondas durante o ensaio que, naturalmente, não correspondem exactamente ao valor teórico de projecto. Mesmo assim, as condições descritas em 5.3.5. foram respeitadas. Cada ensaio teve a duração aproximada de 30 minutos, o que em protótipo corresponderia a um período de aproximadamente 3 horas.

A **série I** de ensaios consistiu na colocação, sobre a restinga, dos cilindros de geossintéticos sem haver qualquer preocupação com as juntas. Os cilindros apenas foram encostados uns nos outros definindo assim o contorno da restinga.

Figura 5.13. – Aspecto geral do modelo para os ensaios da Série I

Na **série II** foi dada mais atenção às juntas, visto que na série I estas não apresentaram um comportamento satisfatório. Fez-se um reforço utilizando tela de geotêxtil e procurou fazer-se um desfasamento das juntas, no sentido de dificultar o escoamento da água acumulada no coroamento da restinga.

Figura 5.14. – Pormenor do desfasamento nas juntas

Figura 5.15. – Aspecto geral do modelo para os ensaios da Série II

Na **série III** foram retirados todos os cilindros de protecção da duna para averiguar a utilidade dos mesmos, com base na observação do movimento de areias.

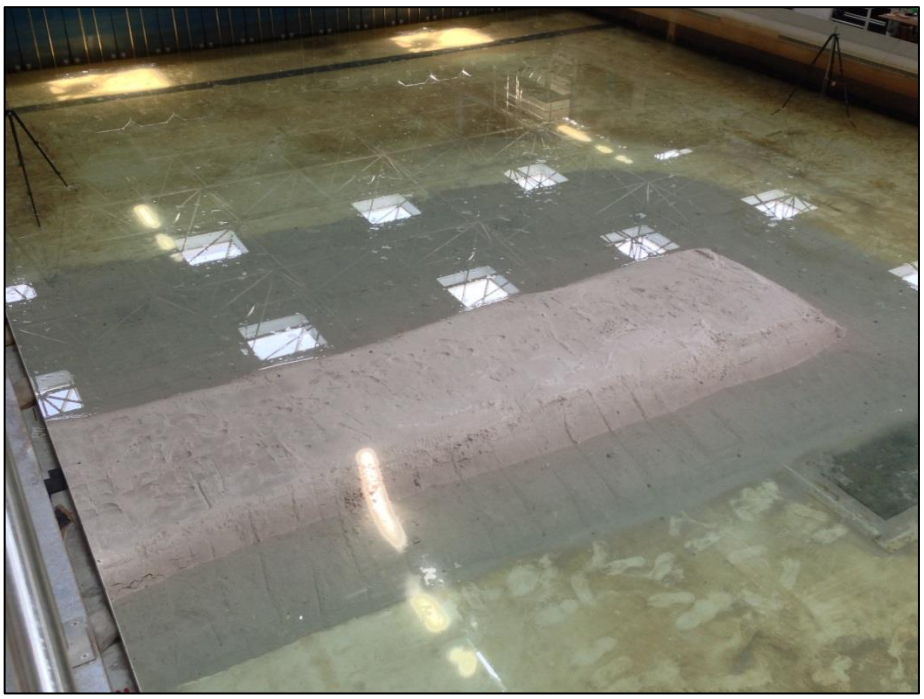


Figura 5.16. - Aspecto geral do modelo para os ensaios da Série III

5.5. RESULTADOS OBTIDOS

Face ao tempo disponiblizado para a utilização do tanque de ondas os resultados obtidos a partir dos ensaios são sobretudo qualitativos. Os ensaios de 30 minutos foram acompanhados ao vivo e no final de cada período de 5 minutos procurou-se registar as principais alterações no modelo, tirando notas e captando fotografias. Nesta secção da dissertação estão descritos os principais acontecimentos registados enquanto que em anexo se apresenta uma extensa colecção de fotografias associadas a cada ensaio.

5.5.1. RESTINGA PROTEGIDA COM CILINDROS DE GEOSSINTÉTICOS (SÉRIE I)

5.5.1.1. Hs=1,5 m e Tp=8 s

Cedo se verificou uma deslocação de poucos centímetros da fiada inferior do lado exposto. Essa deslocação foi mais acentuada no troço mais próximo da parede devido a um efeito que esta fronteira sólida tem na agitação. Houve formação de micro-dunas na praia submersa e no alinhamento das juntas dos cilindros, o que indicava um movimento de material sólido através dessa zona que se depositava na praia submersa. No final do ensaio constatou-se também que haveria uma tendência para o afogamento dos cilindros mais próximos da cabeça (mais visível no cilindro com a cota mais elevada) devido à erosão sentida nessa zona mas, de uma maneira geral, os 3 geocilindros superiores mantiveram-se estáveis. Houve formação de micro-rugas em toda a extensão, numa faixa de 40 cm no pé da estrutura e também na zona da cabeça, que indicavam o sentido do movimento das areias. Os cilindros inferiores acabaram por apresentar um afastamento de cerca de 8 cm.

Figura 5.17. – Estado da restinga após o 1º ensaio da Série I. a) zona exposta, b) zona da cabeça

5.5.1.2. Hs=2,5 m e Tp=10 s

Foi verificado um galgamento aos 2 minutos de ensaio, mas ao longo do ensaio essas ocorrências foram pouco significativas. As suspeitas do trânsito de sedimentos através das juntas confirmaram-se uma vez que se identificaram infiltrações no corpo da restinga ao longo do alinhamento de cilindros e especificamente na zona das juntas. Houve uma extensão das micro dunas a toda a plataforma arenosa submersa, os tubos inferiores continuaram a afastar-se ao passo que os tubos superiores se mantiveram estáveis.

Figura 5.18. – Estado da restinga após o 2º ensaio da Série I. a)zona exposta, b) extremidade restinga

5.5.1.3. Hs=3,5 m e Tp=12 s

Nestas condições os galgamentos tornaram-se mais frequentes, com o escoamento da água galgada a ser feito pelo lado abrigado e também pelas juntas provocando uma erosão generalizada no corpo da restinga. O corpo da restinga foi gradualmente apresentando uma configuração associável ao galgamento e ao fluxo gerado, com a formação de ravinamento do lado abrigado e de uma arriba de erosão do lado exposto, ao longo do alinhamento longitudinal dos cilindros, aproximando-se a sua forma à forma de uma restinga natural. A erosão nas juntas agravou-se, com formação de grandes fossas de erosão. Contudo, os 3 cilindros sobrepostos mantiveram a sua posição, embora apresentando uma certa curvatura associada às fossas de erosão geradas.

Figura 5.19. – Estado da restinga, no lado abrigado após o 2º ensaio da Série I.

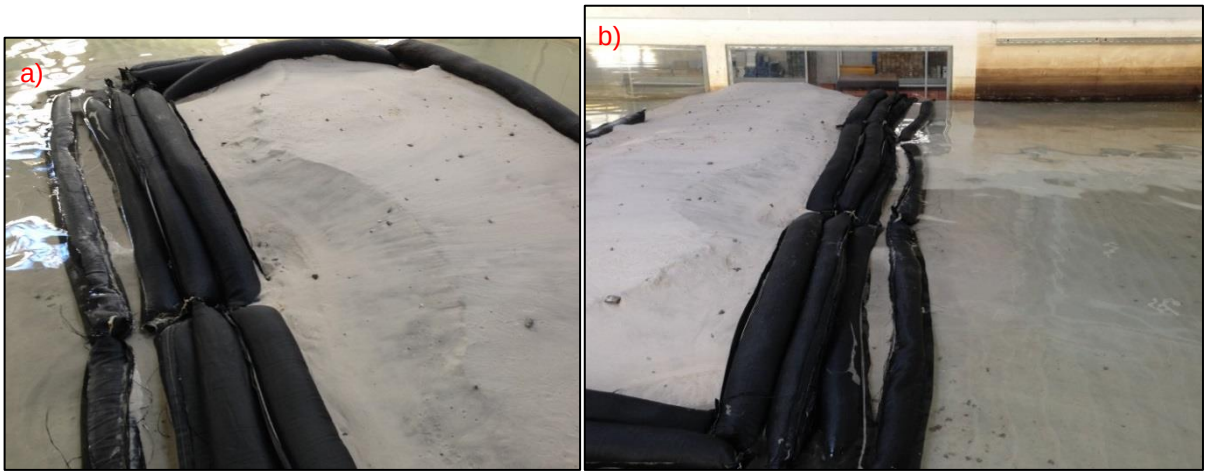


Figura 5.20. – Estado da restinga após o final dos ensaios da Série I. a) pormenor da fossa de erosão nas juntas, b) vista geral sobre o lado exposto

5.5.2. RESTINGA PROTEGIDA COM CILINDROS DE GEOSSINTÉTICOS COM REFORÇO NAS JUNTAS (SÉRIE II)

5.5.2.1. Hs=1,5 m e Tp=8 s

Assistiu-se ao afastamento dos cilindros inferiores apenas na zona da cabeça (3 cm) e da parede (5 cm) enquanto o do troço intermédio se mostrou estável. Não houve formação de micro dunas na direcção das juntas, o que aponta para um melhor comportamento das juntas e consequentemente menor trânsito de sedimentos nessa zona. Mais uma vez houve o aparecimento de formas de fundo (micro rugas), em toda a extensão, numa faixa de 40 cm, que serviam como indicação da direcção em que ocorria o transporte de sedimentos.

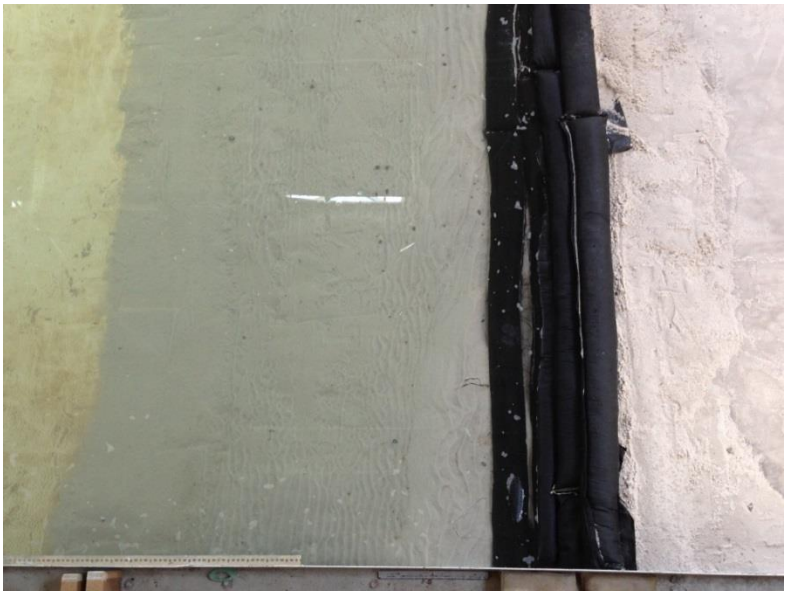


Figura 5.21. – Estado da restinga, no lado exposto, após o 1º ensaio da Série II

Figura 5.22. – Pormenor da junta localizada na cabeça, do lado exposto, após o 1º ensaio da Série II

5.5.2.2. Hs=2,7 m e Tp=10 s

Verificaram-se mais galgamentos. Uma parte da água galgada escoou para o lado abrigado e outra ficou contida no coroamento da restinga, mostrando alguma dificuldade em escoar para o lado exposto devido ao melhor comportamento da juntas. O escoamento do lado exposto fez-se pelo alinhamento do cilindro desfasado mas de forma mais demorada. Houve deposição de areias entre os cilindros da base provenientes da praia submersa, bem como no troço de cilindros com maior cota.

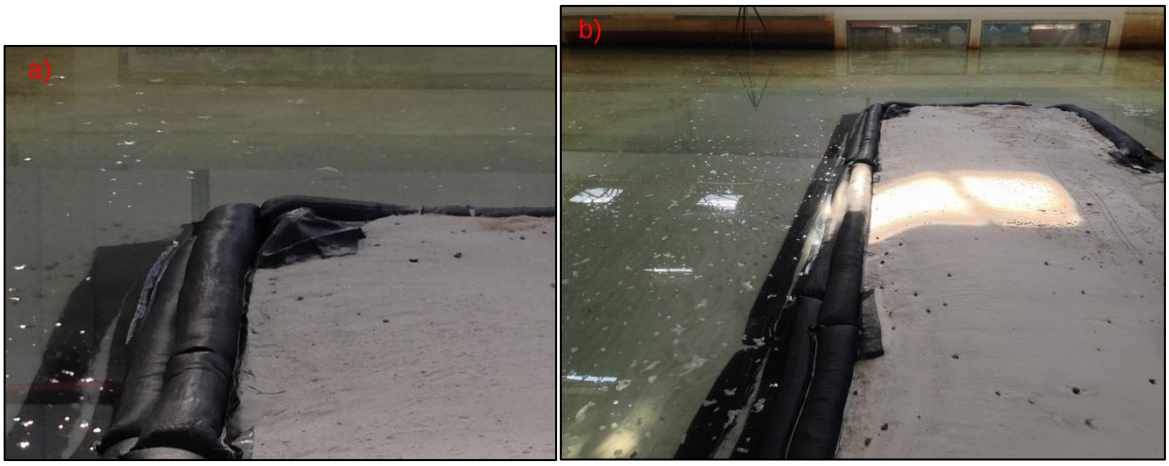


Figura 5.23. – Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. a) pormenor da junta localizada na cabeça do lado exposto, b) vista geral sobre o lado exposto

Figura 5.24. – Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. a)pormenor da junta na zona intermédia do lado exposto, b) pormenor do ravinamento do lado abrigado

5.5.2.3. Hs=3,5 m e Tp=12 s

Registou-se a ocorrência de galgamentos frequentes e a água que galgou tem dificuldade em escoar-se e acumula-se ao longo do alinhamento de tubos superiores, do lado exposto, formando um talude de erosão. O fluxo de galgamento do lado abrigado provoca erosão e instiga a formação de um caminho privilegiado para os galgamentos, pelo lado abrigado não protegido, provocando assoreamento nessa zona. Pela primeira vez assistiu-se ao deslocamento do cilindro inferior do lado abrigado, na zona mais próxima da cabeça. Em relação aos cilindros do lado exposto, o troço intermédio revelou-se bastante estável, enquanto o cilindro superior do lado exposto apresentou grande instabilidade, deslocando-se cerca de 30 cm. As juntas, de uma forma geral, apresentaram um comportamento satisfatório, não se verificando a formação de fossas de erosão.

Figura 5.25. – Estado da restinga durante o último ensaio da Série II. a) pormenor da junta localizada na cabeça do lado exposto, b) pormenor da junta da zona intermédia do lado exposto

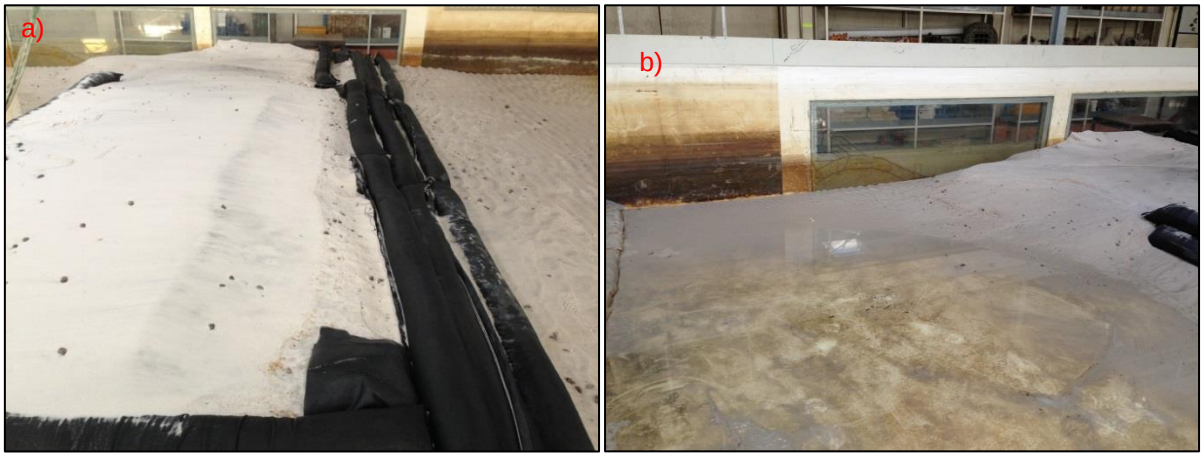


Figura 5.26. – Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. a) vista geral sobre o lado exposto, b) assoreamento do lado abrigado

Figura 5.27. – Estado da restinga após o final dos ensaios da Série II. Pormenor do deslocamento do cilindro de base do lado abrigado.

5.5.3. RESTINGA SEM PROTECÇÃO (SERIE III)

5.5.3.1. Hs=1,5 m e Tp=8 s

Desde o início do ensaio que se assistiu à formação de uma arriba erosão no talude exposto em toda a extensão, excepto junto ao enraizamento, devido ao efeito de parede. Formação de micro rugas numa faixa de 40 cm ao longo de toda a extensão da praia submersa. A arriba de erosão foi progredindo, o que conduziu à perda de largura de coroamento da restinga. Na cabeça também houve formação de uma arriba de erosão, com forma assimétrica, sendo mais acentuada do lado exposto. Do lado abrigado não houve nada a registar.

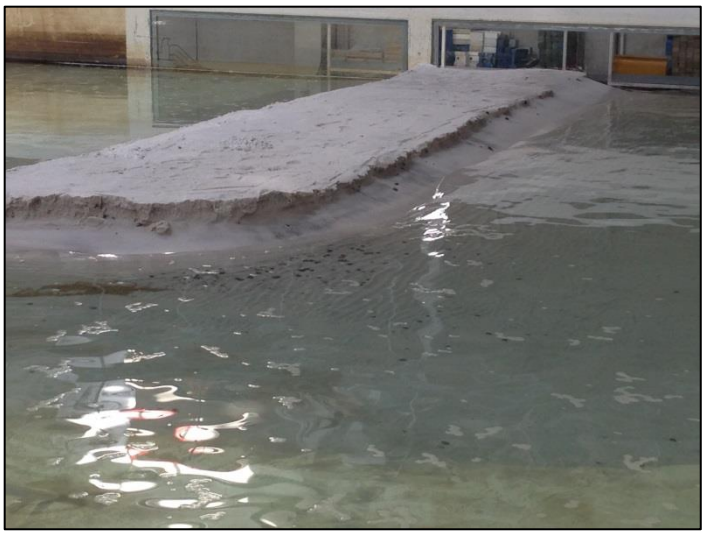


Figura 5.28. – Vista geral da restinga durante o 1º ensaio da Série III

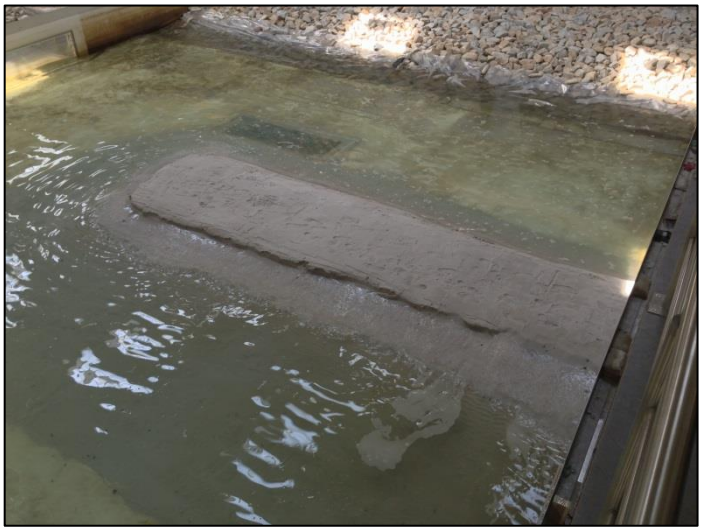


Figura 5.29. – Vista panorâmica sobre a restinga durante o 1º ensaio da Série III

5.5.3.2. Hs=2,7 m e Tp=10 s

Verificou-se a formação de micro dunas em toda a extensão. A arriba de erosão formada no primeiro ensaio desapareceu, formando-se outra arriba mais recuada e mais suave. Ocorreu galgamento total

apenas no terço mais próximo do enraizamento, sendo que nos outros dois terços ocorreu galgamento parcial. Constatou-se que a areia erodida se acumulou junto à cabeça, do lado abrigado, formando-se uma zona emersa assimétrica e com a extremidade voltada para o canal.

Figura 5.30. – Vista panorâmica sobre a restinga durante o 2º ensaio da Série III (cabeça)

Figura 5.31. – Vista panorâmica sobre a restinga durante o 2º ensaio da Série III (enraizamento)

5.5.3.3. Hs=3,5 m e Tp=12 s

Assistiram-se a situações de galgamento frequente e generalizado, com formação de ravinamentos do lado abrigado, associados ao fluxo galgado. A cabeça da restinga sofreu uma grande deformação, e do coroamento inicial só permanece um pequeno alinhamento no centro do corpo da restinga. Houve um grande recuo da arriba e suavização do talude. Do lado exposto, no corpo da restinga, o geotêxtil construtivo ficou a descoberto.

Figura 5.32. – Vista geral sobre a restinga no final dos ensaios da Série III

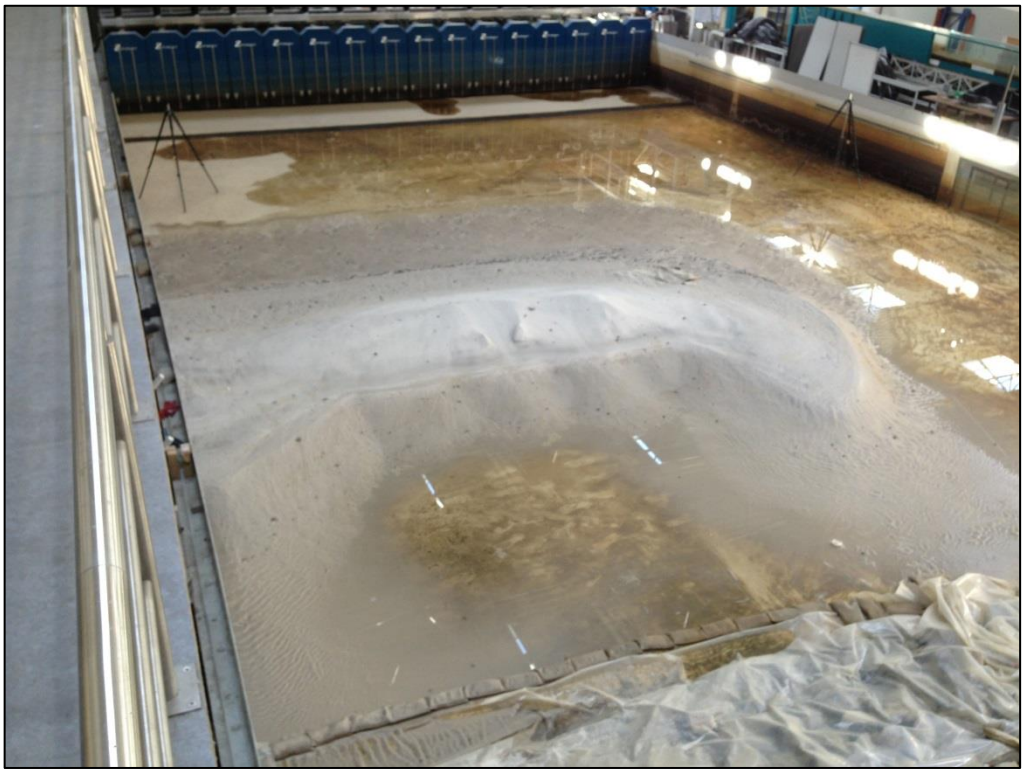


Figura 5.33. – Vista geral sobre a restinga no final dos ensaios da Série III

5.5.4. ANÁLISE GLOBAL DE RESULTADOS

É importante ter em conta o carácter, acima de tudo, comparativo e qualitativo dos testes em modelo físico efectuados. O principal objectivo dos trabalhos efectuados foi o de ensaiar sob a acção de agitação marítima, em condições médias a fortes, na maior escala possível a solução desenvolvida pela WW (2012), propôndo-lhe melhoramentos e também comparando-a à situação não protegida.

De uma maneira geral, em todos os ensaios em que a restinga foi protegida com os cilindros de geossintéticos verificou-se o deslocamento dos cilindros de base. Tal ocorrência aponta para a vantagem de efectuar uma ligação entre este e os restantes cilindros de modo a manter a integridade da estrutura.

Quando aconteciam galgamentos a água escoou por duas zonas principais:

- pelo lado abrigado e não protegido, transportando consigo os sedimentos do corpo da restinga para o lado abrigado, que se depositavam nesse local;
- pelo alinhamento das juntas, formando fossas de erosão no corpo da restinga.

Perante a primeira situação referida, coloca-se a hipótese de seleccionar zonas preferenciais para o escoamento, garantindo que essas mesmas zonas tenham características que não provoquem a degradação do maçico dunar, de modo a ser minimizada a formação de ravinamentos associados ao fluxo galgado. No segundo caso referido, verificaram-se grandes melhorias com o reforço e desfasamento aplicados nas juntas (figura 5.34.). A água contida no coroamento da restinga mostrou maiores dificuldades em escoar ao mesmo tempo que a erosão no corpo da restinga, no lado exposto, apresentou uma configuração mais uniforme ao longo do alinhamento dos cilindros e não tão concentrada no alinhamento das juntas.

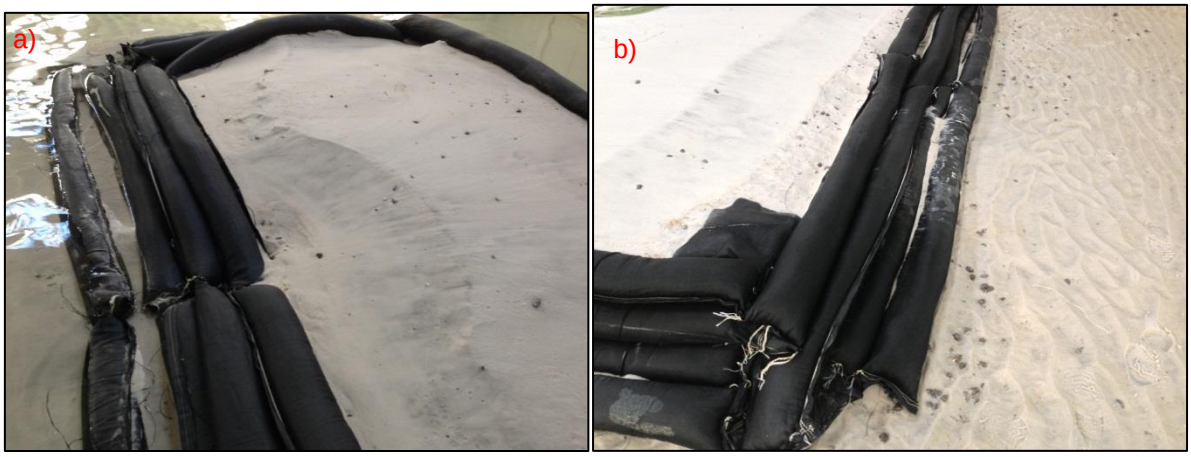


Figura 5.34. – a) Fossa de erosão localizada na junta b) talude de erosão com configuração uniforme

O facto de se terem verificado maiores galgamentos nos ensaios da Série II em relação à Série I leva a crer que a estrutura construída no segundo caso, por ter sido feita de forma mais coesa e com maior preocupação no reforço das juntas, provocava uma menor dissipação de energia no momento da rebentação das ondas sobre a estrutura o que conduzia a que a energia se dissipasse através do fenómeno referido.

Ainda referente à segunda série de ensaios, o cilindro com maior cota na zona do enraizamento gerou grandes preocupações uma vez que sofreu uma translação de cerca de 30 centímetros, que em protótipo seriam cerca de 9 metros. Tal deslocamento não se verificou nos primeiros ensaios, mas esta ocorrência alerta para o facto de poder ser necessário tomar medidas de prevenção.

A deposição de areias nos cilindros de menor cota do lado abrigado (figura 5.34.) sugerem que o remate possa ser feito com características mergulhantes, de modo a facilitar a passagem de areias.

Figura 5.35. – Deposição de areias nos cilindros com cota mais baixa do lado abrigado a)Final dos ensaios da Série I b) Final dos ensaios da Série II

A série III teve grande utilidade pois através dos ensaios realizados pode ser feita a aferição dos efeitos que a agitação marítima tem sobre a restinga. Esta, que no início tinha uma forma bem definida, sofreu grandes alterações tendo ocorrido movimentações de grandes volumes de sedimentos que se acumularam a sotamar da estrutura, que em protótipo é uma zona de canal cuja navegabilidade está constantemente sob ameaça. Nesta série, a tela de geotêxtil que separava o núcleo de brita da restante areia ficou a descoberto, o que indica que os fenómenos erosivos podem ter consequências ainda mais devastadoras (se o modelo fosse construído totalmente em areia a erosão verificar-se-ia em cotas mais baixas).

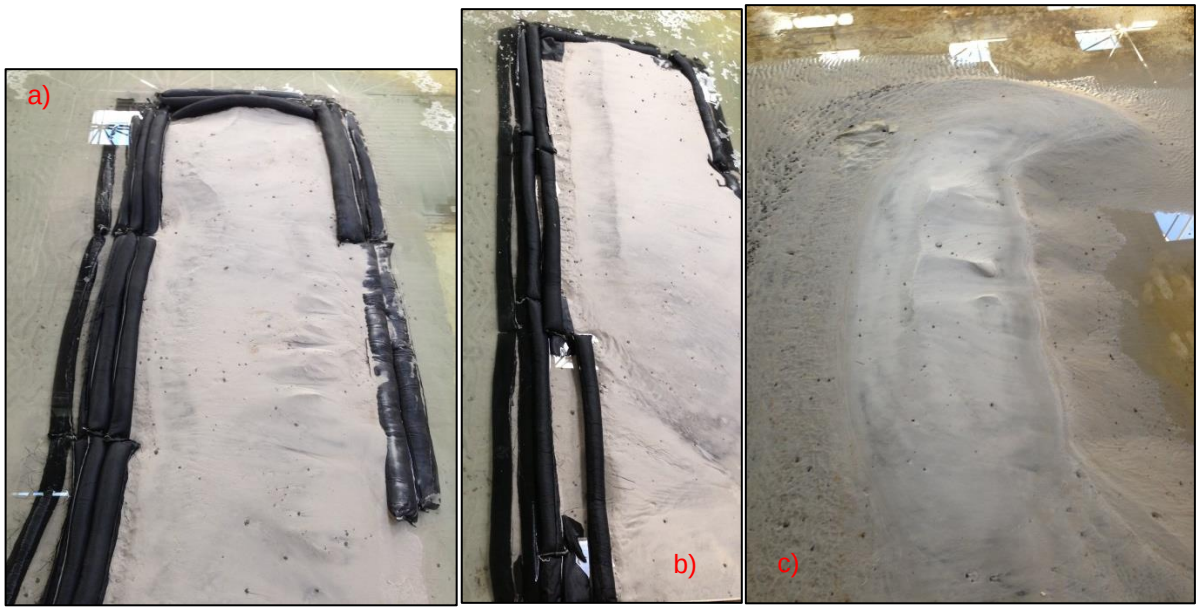


Figura 5.36.- Vistas panorâmicas do corpo da restinga a) Final dos ensaios da Série I; b) Final dos ensaios da Série II; c) Final dos ensaios da Série III

Figura 5.37. Perfis do modelo a) Início dos ensaios da Série I; b) Final dos ensaios da Série I; c) Final dos ensaios da Série III

5.5.5. NOTA FINAL –CONSIDERAÇÕES ACERCA DE MODELOS DE FUNDOS MÓVEIS

Num modelo físico, os resultados e observações obtidos são sempre afectados de erros associados aos efeitos de escala, efeitos de laboratório e precisão dos instrumentos de medição.

Um modelo físico costeiro deveria reproduzir a interacção completa entre os diversos fenómenos, tais como, ondas curtas, ondas longas, transporte sedimentar, entre outros. No entanto, não é possível encontrar relações de escala que permitam a semelhança de todas as interacções presentes. Os principais efeitos de laboratório estão relacionados com as restrições físicas impostas ao escoamento pelas fronteiras, os efeitos introduzidos pela geração mecânica de ondas e correntes e as simplificações aos processos físicos. (Silva 2010)

A análise dos efeitos de escala em modelos costeiros de fundos móveis deve incluir não só os efeitos que resultam das dissimilitudes para os processos mecânicos mas também aqueles que surgem das similitudes para os processos sedimentares. O autor Kamphuis, 1985, referido por Silva, 2010, aponta como aspectos mais influenciáveis a densidade relativa, uma vez que a utilização de materiais leves resulta em acelerações inferiores das partículas e por isso taxas de transporte inferiores e criação de zonas de acumulação de partículas exageradas, e o comprimento relativo dos sedimentos uma vez que o tamanho dos sedimentos quando não é reproduzido de acordo com a escala geométrica as forças requeridas para o seu movimento é exagerado..

Assim sendo, há que ter que conta que os resultados dos ensaios apresentam diferenças em relação ao que aconteceria em protótipo.

6

6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1. CONCLUSÕES

O principal propósito desta dissertação foi, de facto, o estudo do comportamento de uma solução inovadora, para a contenção de uma restinga muito móvel, tendo como base a solução projectada proposta pela WW (2012) para a restinga de Ofir com cilindros de geossintéticos. Apesar do uso deste tipo de técnicas ter vindo a aumentar continuamente, de uma maneira geral, nos mais diversos campos da Engenharia Civil, ainda são muitas as desconfianças em relação à sua aplicação em obras de protecção costeira. Tal facto, aponta para a necessidade de serem efectuados mais estudos deste tipo de modo a reduzir as incertezas e os receios que ainda lhe estão associados. Nesse sentido, este trabalho foi mais um passo em frente nesta área.

No estudo em modelo físico, descrito no capítulo 5, procurou-se representar uma parte da restinga considerando um troço que compreendesse a zona da extremidade, visto que é a zona que apresenta maiores modificações ao longo das últimas décadas e por isso motiva maiores preocupações. Foram efectuadas três séries de três ensaios, em duas delas foi aplicado o reforço e na última não. O clima de agitação gerado foi assumido como típico da costa litoral norte portuguesa (Hs = 1.5-3.5 m e Tp=8-12 s).

Das duas primeiras séries de ensaios, pode concluir-se:

- Os cilindros de base têm tendência a destacar-se da restante estrutura o que aponta para a necessidade de ser efectuada uma ligação entre este e os restantes
- Os galgamentos são inevitáveis na medida em que a cota de implantação do projecto assim o permite, por razões paisagísticas. Na situação de galgamentos, o caudal galgado escoa-se principalmente pela zona das juntas, provocando erosões localizadas, ou pelo lado abrigado e não protegido, transportando consigo os sedimentos do corpo da restinga para o lado abrigado, que se depositavam nesse local
- As alterações efectuadas no alinhamento das juntas introduziram grandes melhorias no comportamento da estrutura. Apenas desfasando um dos alinhamentos do cilindro e aplicando um pouco de tela de geotêxtil nestas zonas problemáticas, conseguiu-se uma mitigação dos efeitos erosivos localizados.

Da terceira série de ensaios a conclusão que se retira é que é efectivamente necessária a intervenção na restinga de Ofir, na medida em que as consequências da agitação ao longo do tempo poderão por em causa a sua existencia, deixando assim de desempenhar a sua principal função, a defesa da população e estruturas de Esposende.

Esta tese, compreendeu ainda uma revisão da literatura existente acerca do material utilizado no reforço, no sentido de compreender melhor como se comportam este tipo de materiais, tendo em conta as características físicas, hidraulicas e mecânicas. Apesar destes materiais apresentarem uma ampla gama de aplicações, a escolha do material mais adequado para desempenhar determinada função requer uma reflexão cuidada no sentido de escolher as propriedades, em detrimento de outras, que sejam mais importantes.

Convém realçar que existe a necessidade de realizar investigação sobre vários aspectos relacionados com a utilização destes sistemas antes que os mesmos possam ser utilizados com confiança. Restam ainda muitas incertezas quanto ao seu desempenho em climas altamente energéticos. Por outro lado, a exposição permanente dos geocilindros aos raios UV conduz a que os mesmos tenham necessariamente um período de vida útil mais reduzido.

Por último, o facto de terem sido efectivamente propostos melhoramentos decorrentes da observação de problemas na estrutura, ao potencial instalador constitui um motivo de orgulho para todos os intervenientes em todo o processo de elaboração desta dissertação.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em modelação física, e neste caso em específico há que ter em consideração que se está a proceder a uma simplificação de um problema real. Assim, são associáveis à construção de um modelo, alguns efeitos responsáveis por ligeiras (ou grandes) diferenças. Pensa-se que no futuro, fará sentido continuar a testar modelos deste tipo, mas melhorando-o através das seguintes acções sugeridas:

- Fazer o levantamento da batimetria da zona estudada. No ensaio de modelo físico utilizado, a forma dos fundos móveis foi simplificada para um talude de inclinação constante, uma vez que não foram encontrados dados no projecto sobre esse aspecto. Porém, na situação real, certamente que a situação é bem diferente, pelo que a correcta modelação da batimetria poderá introduzir mudanças significativas no tipo de agitação;
- Continuar a reforçar os pontos problemáticos estudados. Foi constatado que apenas procedendo a ligeiras alterações (desfasamento de um alinhamento de cilindros e introdução de geotêxtil nas juntas) se conseguiram resultados substancialmente melhores, o que indica que, de facto, esses pormenores poderão fazer a diferença. Seria interessante, observar o comportamento da estrutura utilizando cilindros de vários tamanhos, de modo a obter um desfasamento total das juntas, e não apenas de um dos alinhamentos e também a introdução de uma tela geotêxtil em todo o comprimento reforçado. Aliás, a tela foi fornecida pela GEOSIN® porém a janela temporal disponível não permitiu a realização de um quarto ensaio;
- Incluir ligações entre cilindros (cintas, por exemplo), de modo a consolidar a estrutura procurando que os cilindros mantenham a sua posição até ao final dos ensaios;
- Testar diferentes configurações para o reforço. O reforço utilizado durante os testes foi o proposto pela empresa projectista, porém teria algum interesse experimentar outro tipo de configuração e comparar alternativas;
- Considerar tipologias diferentes de remate na zona abrigada, de modo a facilitar o trânsito de sedimentos nessa zona.

BIBLIOGRAFIA

[1] Aguilar, S., Pimentel, A., *Coastal dune stabilization using geotextile tubes at Las Coloradas*. Geosynthetics Magazine, 2008

[2] Alves, J., *Estudo Experimental de um Recife Artificial para Sur e Defesa Costeira em Materiais Geossintéticos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.

[3] Antunes do Carmo, J *et al*. *Rehabilitation of a Geotextile-Reinforced Sand Dune*. 5 páginas, Journal of Coastal Research, Special Issue 56, 2009.

[4] Bathrust, R.J. *Classificação de Geossintéticos*. 2 páginas, International Geosynthetics Society.

[5] Bathrust, R.J. *Geossynthetics Functions*. 2 páginas, International Geosynthetics Society.

[6] Bueno, B.. *Geossintéticos – Propriedades, Especificações e Ensaios*. Escola de Engenharia de São Carlos.

[7] Carneiro, J., *Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental –A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2009

[8] Coelho, C., 2011, *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2005.

[9] das Neves, L., *Geossintéticos e Geossistemas em Engenharia Costeira*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2003.

[10] das Neves, L., *Experimental Stability Analysis of Geotextile Encapsulated Sand Systems Under Wave Loading*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2011.

[11] das Neves, L., *Fluência de Geotêxteis*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1999.

[12] Loureiro, E.,. *Indicadores Geomorfológicos e Sedimentológicos na Avaliação da Tendência Evolutiva da Zona Costeira (Aplicação ao concelho de Esposende)*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, 2006.

[13] Mattos Vidal, D.. *Geotêxtil: Propriedades e Ensaios – Manual Técnico.* 43 páginas, Geossintéticos Bidim.

[14] Pinho Lopes, M.; Lopes, M.L. (2010). *A durabilidade dos geossintéticos*, Porto, Portugal: FEUP edições, 294p

[15] Quintela, A., *Hidráulica*. Fundação Calouste Gulbenkian, 12ª Edição, 2011.

[16] Shercliff, D. *Geosynthetics in coastal Applications: Protection, Filtration and Placement Issues*. GEOfabrics Limited, United Kingdom.

[17] Rosa Santos, P., *Análise da Interacção de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões*. Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2010

[18] Silva, R., *Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução de Linha de Costa.* Dissertação de Doutoramento, FEUP, 2010

[19] Sousa, F., *Estudo de Soluções de Enraizamento de Esporões*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012.

[20] Taveira-Pinto, F. (2012). Modelação Física. Slides da Disciplina de Trabalhos Marítimos 2, FEUP

[21] Vários Autores, *Reforço de Solos – Manual Técnico.*168 páginas, Maccaferri Brasil, 2009.

[22] Vários Autores, *An Introduction to Geosynthetics.*8 páginas, GEOfabrics Limited, United Kingdom.

[23] Veloso Gomes, F., *et al*, *Relatório sobre a Restinga de Ofir/Esposende*. 2011.

[24] WW Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A, *Manutenção e Reforço do Cordão Dunar da Restinga de Ofir. 2012.*

[25] http://www.igsbrasil.org.br/. Maio 2013

[26] http://www.explicatorium.com/quimica/Polimeros.php Junho 2013

[27] https://pt.wikipedia.org/wiki/Geossint%C3%A9tico Junho 2013

ANEXO A
CARTA GEOMORFOLÓFICA DA REGIÃO DE ESPOSENDE

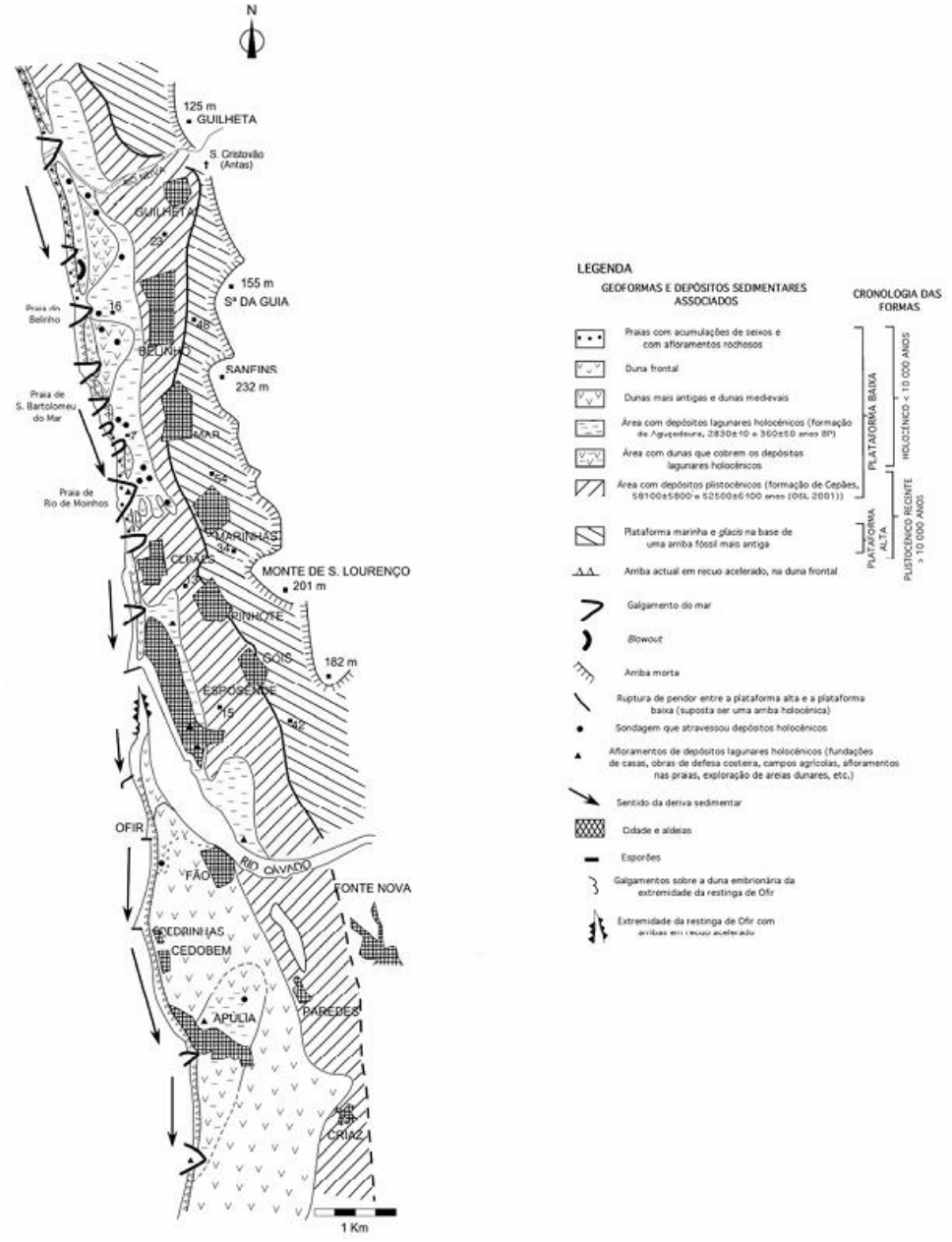

N
125 m
GUILHETA
S. Cristovão (Antas)
155 m
Sª DA GUIA
SANFINS
232 m
MONTE DE S. LOURENÇO
201 m
182 m
OFIR
FÃO
RIO CAVADO
FONTE NOVA
CEDOBEM
APÚLIA
PAREDES
CRIAZ
1 Km
LEGENDA
GEOFORMAS E DEPÓSITOS SEDIMENTARES ASSOCIADOS
CRONOLOGIA DAS FORMAS
Praias com acumulações de seixos e com afloramentos rochosos
Duna frontal
Dunas mais antigas e dunas medievais
Área com depósitos lagunares holocénicos (formação de Aguçadoura, 2830±10 e 360±50 anos (P))
Área com dunas que cobrem os depósitos lagunares holocénicos
Área com depósitos plistocénicos (formação de Cepães, 58100±5800 e 52500±6100 anos (OSL 2001))
Plataforma marinha e glacis na base de uma arriba fóssil mais antiga
Arriba actual em recuo acelerado, na duna frontal
Galgamento do mar
Blowout
Arriba morta
Ruptura de pendor entre a plataforma alta e a plataforma baixa (suposta ser uma arriba holocénica)
Sondagem que atravessou depósitos holocénicos
Afloramentos de depósitos lagunares holocénicos (fundações de casas, obras de defesa costeira, campos agrícolas, afloramentos nas praias, exploração de areias dunares, etc.)
Sentido da deriva sedimentar
Cidade e aldeias
Esporões
Galgamentos sobre a duna embrionária da extremidade da restinga de Ofir
Extremidade da restinga de Ofir com arribas em recuo acelerado
PLATAFORMA BAIXA
PLATAFORMA ALTA
HOLOCÉNICO < 10 000 ANOS
PLISTOCÉNICO RECENTE > 10 000 ANOS

Figura A.1 - Carta Geomorfológica da região de Esposende/Ofir (Fonte: Loureiro, 2006)

ANEXO B
PLANTA DA SOLUÇÃO DESENVOLVIDA PELA WW (2012)

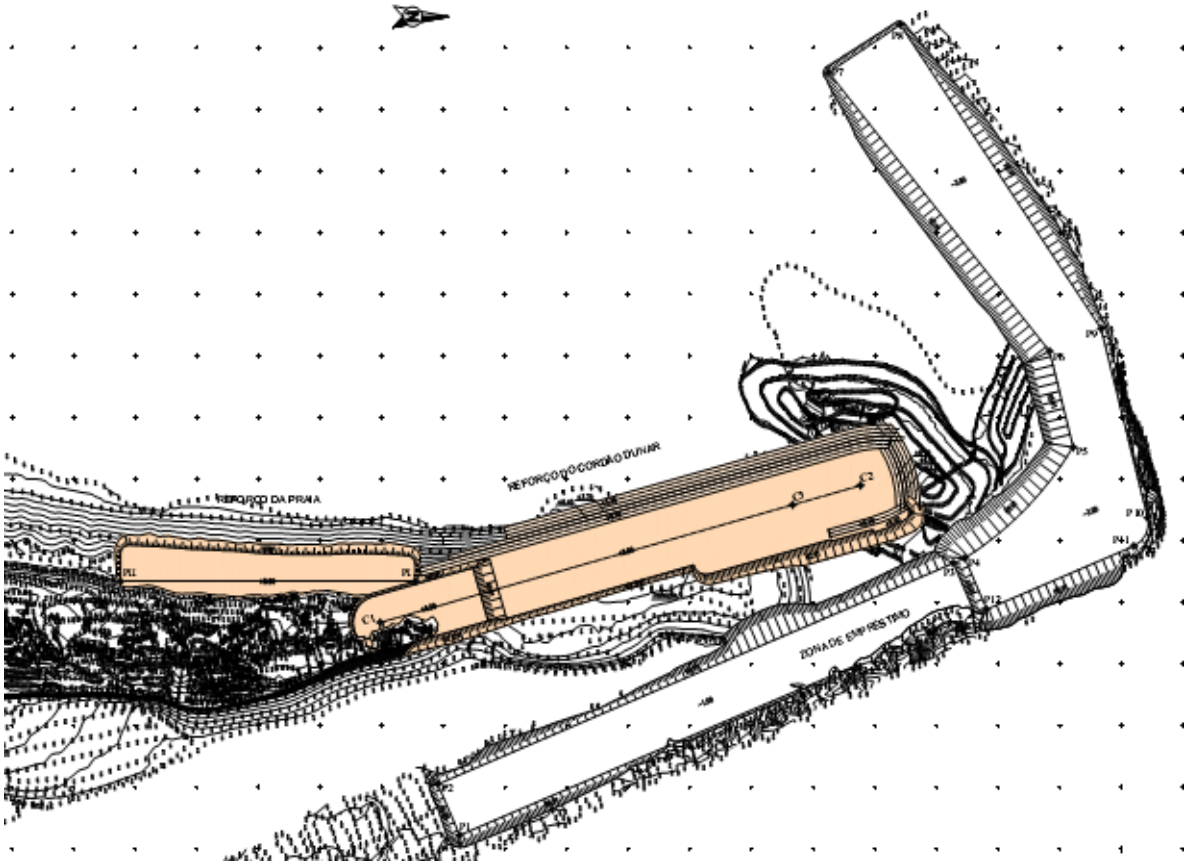
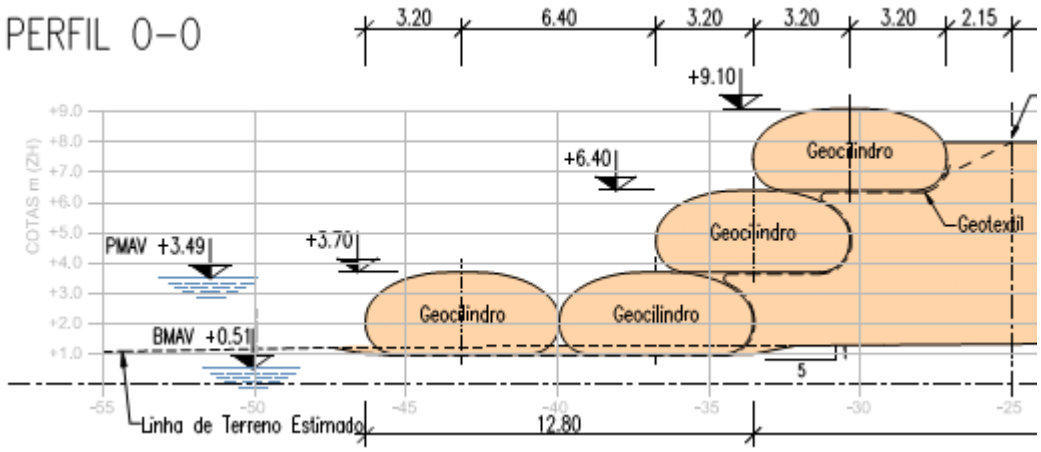


Figura B.1 - Planta da solução desenvolvida pela empresa WW (2012)



1 Figura B.2 – Perfil-tipo da zona exposta da restinga (WW 2012)

ANEXO C
REGISTOS FOTOGRÁFICOS DO TANQUE DE ONDAS

Construção do Modelo

Figura C.1. – Colocação da brita constituinte do núcleo da restinga

Figura C.2. – Colocação da brita constituinte do núcleo da restinga

Figura C.3. – Colocação da areia no corpo da restinga

Figura C.4. – Colocação da areia no corpo da restina

Figura C.5. – Colocação dos geocilindros de protecção á restinga

Figura C.6. – Cilindros colocados na sua posição final

Ensaio 1 – Série I

Figura C.7. – Vista geral sobre a restinga antes do início dos ensaios

Figura C.8. – Vista geral sobre a restinga durante o ensaio

Figura C.9. – Zona da cabeça da restinga do lado exposto

Figura C.10. – Zona da cabeça da restinga do lado abrigado. Difracção.

Figura C.11. – Perfil da restinga na fase final do primeiro ensaio

Figura C.12. – Zona da cabeça do lado abrigado no final do ensaio

Ensaio 2 – Série I

Figura C.13. – Vista geral sobre a restinga

Figura C.14. – Pormenor da junta durante o ensaio

Figura C.15. – Vista geral sobre a restinga durante o ensaio

Figura C.16. – Lado abrigado

Figura C.17. – Vista geral sobre a restinga durante o ensaio

Figura C.18. – Galgamento

Ensaio 3 – Série I

Figura C.19. – Vista geral sobre a restinga durante o ensaio

Figura C.20. – Galgamento

Figura C.21. – Vista geral sobre a restinga do lado da cabeça

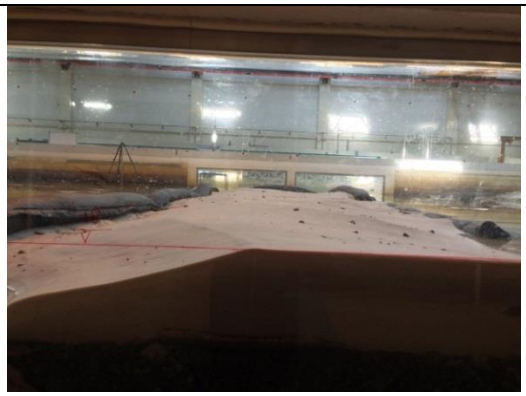


Figura C.22. – Perfil da restinga no final do ensaio (zona central)

Figura C.23. – Fossas de erosão na zona das juntas

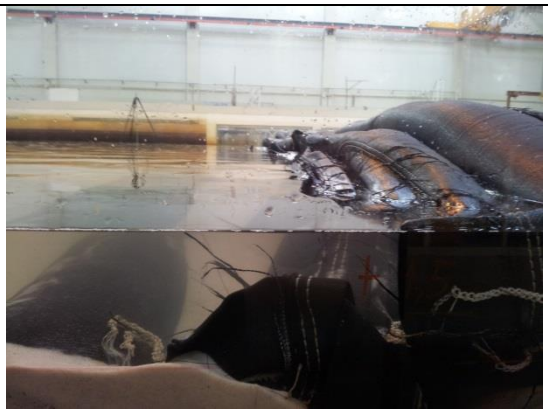


Figura C.24. – Perfil da restinga no final do ensaio (cilindros do lado exposto)

Ensaio 1 – Série II

Figura C.25. – Viste geral sobre a restinga no início dos ensaios

Figura C.26. – Pormenor da junta entre o lado exposto e cabeça da restinga

Figura C.27. – Pormenor do desfasamento da junta

Figura C.28. – Pormenor da junta reforçada

Figura C.29. – Lado exposto da restinga durante o ensaio

Figura C.30. – Pormenor da junta durante o ensaio

Ensaio 2 – Série II

Figura C.31. – Pormenor da junta durante o ensaio

Figura C.32. – Acumulação de água galgada no coroamento da restinga

Figura C.33. – Viste geral sobre a restinga no final do ensaio

Figura C.34. – Ravinamentos do lado abrigado

Figura C.35. – Lado exposto da restinga no final do ensaio

Figura C.36. – Lado exposto da restinga no final do ensaio

Ensaio 3 – Série II

Figura C.37. – Acumulação de água galgada no coroamento da restinga

Figura C.38. – Formação do talude de erosão

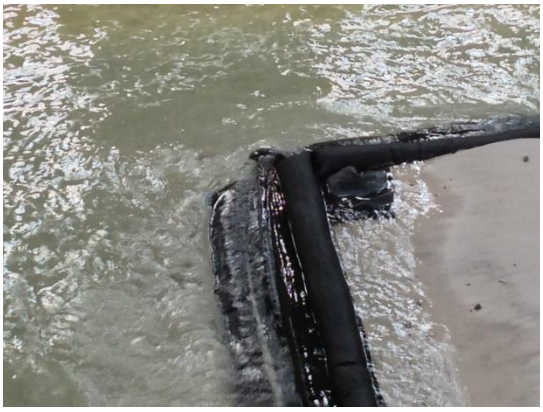


Figura C.39. – Aprisionamento de água galgada na zona da cabeça

Figura C.40. – Zona do enraizamento da restinga

Figura C.41. – Deslocamento do cilindro com cota mais elevada junto ao enraizamento

Figura C.42. – Vista geral sobre a restinga na parte final dos ensaios

Ensaio 1 – Série III

Figura C.43. – Vista geral do modelo físico antes do início dos ensaios

Figura C.44. – Vista geral sobre o modelo durante o ensaio

Figura C.45. – Zona da cabeça da restinga durante o ensaio. Difracção.

Figura C.46. – Zona da cabeça da restinga do lado exposto.

Figura C.47. – Vista em perfil da restinga do lado exposto. Talude de erosão.

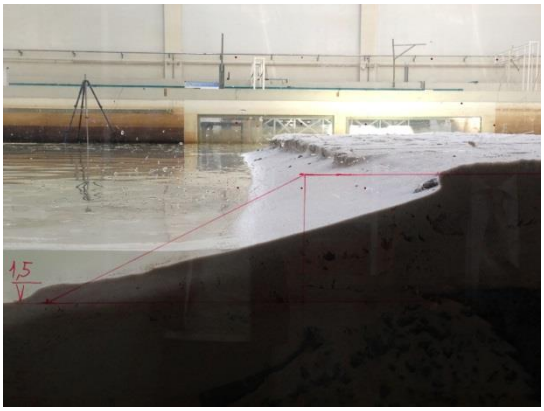


Figura C.48. – Secção transversal da restinga do lado exposto no final do ensaio

Ensaio 2 – Série III

Figura C.49. – Vista panorâmica sobre a restinga

Figura C.50. – Vista geral do corpo da restinga durante o ensaio.

Figura C.51. – Talude de erosão mais suave do lado exposto

Figura C.52. – Assimetria do corpo da restinga provocada pela agitação

Figura C.53. – Ravinamentos no corpo da restinga associados a galgamentos

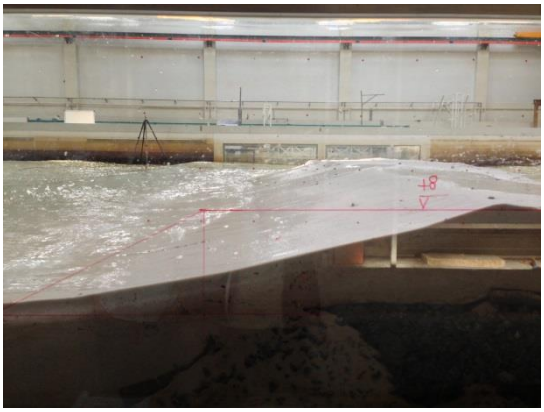


Figura C.54. – Secção transversal da restinga no final do ensaio

Ensaio 3 – Série III

Figura C.55. – Vista geral sobre a restinga

Figura C.56. – Assimetria mais acentuada do corpo da restinga

Figura C.57. – Grandes alterações face á configuração inicial da restinga

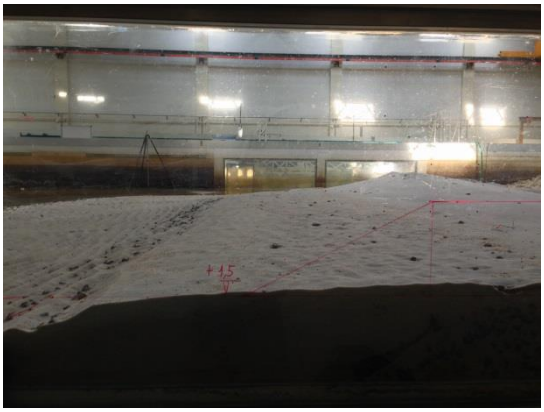


Figura C.58. – Secção transversal da restinga no final dos ensaios

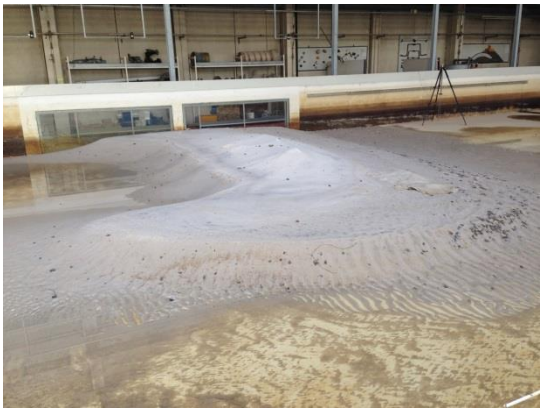


Figura C.59. – Configuração final da restinga

Figura C.60. – Configuração final da restinga